INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE
LABORATOIRE DE RECHERCHE EN GENIE DES SYSTEMES INDUSTRIELS

LA SIMULATION DE L'ACTIVITE COMME OUTIL D'AIDE A LA CONCEPTION ET A L'INNOVATION.

Application à la conception du poste de conduite des TGV futurs.

Thèse présentée en vue de l'obtention du Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine en Génie des Systèmes Industriels

Soutenue publiquement le 11 janvier 1999 par

Peggy ZWOLINSKI

JURY

Président :	M. Patrick TRUCHOT Professeur à l'ENSGSI de Nancy
Rapporteurs :	M. Robert DUCHAMP Professeur à l'ENSAM de Paris
	M. Jean-Michel RUIZ Professeur à l'ENSSPICAM, Université d'Aix-Marseille III
Examinateurs :	M. Olivier GARRO Professeur à l'UTBM de Belfort
	M. Christian RAIMOND Département métier de la SNCF à Paris
	M. Philippe CHAPPET Responsable R&D chez ALSTOM Transport à Belfort.
Directeurs de thèse :	Mme Claudine GUIDAT Professeur et Directeur de l'ENSGSI de Nancy
	M. Jean-Claude SAGOT Maître de conférences et responsable de l'ERCO à l'UTBM de Belfort

LA FACULTE N'ENTEND DONNER NI APPROBATION
NI IMPROBATION AUX OPINIONS EMISES DANS LA THESE
CES OPINIONS DEVANT ETRE CONSIDEREES COMME PROPRES A LEUR AUTEUR

Remerciements

Je tiens à remercier les membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :

Je souhaite, tout d'abord, exprimer mes profonds remerciements à **Claudine GUIDAT**, Professeur à l'ENSGSI, pour avoir accepté de diriger ma thèse, pour l'intérêt qu'elle a porté à mon travail et pour l'aide et la confiance qu'elle m'a accordée.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à **Jean-Claude SAGOT**, responsable de l'équipe d'Ergonomie et de Conception, sans qui rien n'aurait été possible. Je tiens à lui exprimer ma gratitude, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe, pour la confiance et le soutien qu'il m'a apporté dans la réalisation de mes projets, et pour avoir accepter de diriger cette thèse.

J'adresse toute ma reconnaissance à **Robert DUCHAMP**, Professeur à l'ENSAM, qui m'a permis d'effectuer mes premiers pas dans la recherche, dans le cadre du DEA « Conception de Produits Nouveaux ». Je le remercie vivement d'avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à **Jean-Michel RUIZ**, Professeur à l'ENSSPICAM, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et pour m'avoir fait l'honneur d'être rapporteur de cette thèse.

Mes remerciements vont aussi à **Olivier GARRO**, Professeur à l'UTBM, pour sa disponibilité, pour ses conseils et suggestions qui m'ont été d'une aide précieuse.

J'adresse un merci tout particulier à **Patrick TRUCHOT**, Professeur à l'ENSGSI (Nancy), pour m'avoir encouragé, lors de mon DEA, à poursuivre une thèse. Je lui témoigne toute ma gratitude pour ses conseils avisés, pour l'aide et le soutien qu'il m'a apporté.

J’exprime ma plus vive reconnaissance à **Philippe CHAPPET**, de la société ALSTOM Transports, pour m’avoir permis de participer à un grand projet industriel et pour avoir accepter d’être membre du jury.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à **Christian RAIMOND**, de la SNCF, pour la confiance qu’il m’a accordé, et pour toute l'aide qu’il m’a apportée, ce qui m’a permis d’effectuer mes recherches dans les meilleures conditions. Je le remercie pour sa disponibilité et pour avoir accepté d’être membre du jury.

Ce projet n’aurait pu aboutir sans la participation de nombreuses personnes et en particulier les membres du groupe projet, que je tiens tout particulièrement à remercier :

Jean-Pierre LORINQUER, **Didier GARRET**, ainsi que toutes les autres personnes de la SNCF ou de la société ALSTOM, qui ont été impliquées dans ce projet.

Les conducteurs qui ont participé au groupe projet et/ou aux évaluations, pour leur disponibilité, leur patience et la confiance qu’ils m’ont accordée.

Les conducteurs qui nous ont fait découvrir leur métier lors de nos différents accompagnements en cabine de conduite.

M. BENCHEKROUN, ainsi que toutes les personnes de l’ERCO, qui au cours de ces dernières années ont participé à ce projet de conception du poste de conduite du TGV NG.

J’associe également à ces remerciements, toutes les personnes qui m’ont aidé et soutenu dans la réalisation de cette thèse. Merci Sam et Valérie, pour votre aide de tous les jours. Merci Sylvie pour ton soutien et pour la correction de ce document. Merci Gérard, Louisa, Raed, et les autres pour votre aide, vos conseils et votre soutien amical. Merci à mes amis et à ma famille, pour votre patience et votre compréhension. Enfin, merci Eric pour ton soutien et tes encouragements.

La science ne se divise pas.
Contre la séparation cartésienne en deux branches,
fondamentale et appliquée,
la technologie retrouve enfin ses lettres de noblesse :
l'épistémologie, en reconnaissant la complexité de l'acte de conception,
réconcilie le savoir et le faire.

Jean Louis LE MOIGNE (1996)

Avant propos

Le travail présenté dans ce mémoire a été mené au sein de l'équipe d'ERgonomie et COnception (l'ERCO) de l'UTBM, équipe rattachée au Laboratoire de Recherche en Génie des Systèmes Industriels (LRGSI) de Nancy - UPRES n°EA 1147.

Ce document fait la synthèse des études et recherches que nous avons effectuées concernant un large projet industriel portant sur la définition du poste de conduite d'une Nouvelle Génération de Train à Grande Vitesse (TGV NG). Nos différents travaux, en tant qu'ingénieur salariée de l'association PERSEE (Association pour la Promotion de l'Enseignement et de la Recherche dans Sévenans et son Environnement Economique - Association loi 1901 des enseignants chercheurs de l'IPSé), ont ainsi été réalisés en étroit partenariat avec la SNCF et la société ALSTOM.

Les travaux qui ont été menés dans le cadre de la phase d'études préliminaires, avaient permis au groupe projet de définir le champ des activités futures souhaitables des conducteurs, souhaitables en termes de sécurité, de confort et d'efficacité. Cette première phase qui a débuté il y a 7 ans et à laquelle je n'ai pas directement participé, a permis au groupe projet de mettre en évidence la nouvelle philosophie de conduite, en s'appuyant sur la définition du futur métier des conducteurs.

Cette définition du champ des activités futures souhaitables, associée à la mise en place de scénarios avec les conducteurs, nous a permis, dès l'étape de définition des préconcepts, d'orienter les choix de conception. Plusieurs préconcepts ont ainsi été proposés et réalisés sous forme de maquettes afin de pouvoir mettre en place des bancs d'essais qui permettent d'effectuer des simulations de certaines conditions d'exercice de l'activité et d'examiner l'activité menée par les conducteurs confrontés aux nouveaux dispositifs. Les résultats des évaluations ont contribué à l'intégration des recommandations ergonomiques lors de cette étape de conception, et ont permis de confirmer certaines hypothèses formulées par le groupe projet concernant le champ des activités futures souhaitables.

Lors des études détaillées, la mise en place d'un simulateur d'étude et de conception nous a conduits à mener des évaluations plus globales du poste de conduite, en recréant des conditions d'exercice de l'activité les plus proches possible de la réalité. Ces évaluations nous ont permis d'optimiser les dispositifs en cours d'étude, et d'examiner les performances du nouveau système homme-machine afin de pouvoir valider la mise en place des dispositifs futurs sur une rame prototype de TGV.

La démarche de simulation de l'activité de conduite, appliquée tout au long du projet de conception des postes de conduite des TGV futurs, a constitué une véritable aide à la conception et à l'innovation.

Sommaire

1. PROBLÉMATIQUE ---------- 11
1.1 Apports et limites des méthodes de conception de produits. ---------- 16
1.2 Apports et limites de l'ergonomie en conception de produits. ---------- 23
1.3 Les outils communs pour la prise en compte du facteur humain et des facteurs techniques ---------- 28
1.4 Simuler le travail : une aide à la conduite de projet (MALINE, 1994) ---------- 29
1.5 Les applications actuelles de la simulation de certaines conditions d'exercice de l'activité de conduite ---------- 35
1.6 La démarche de simulation de l'activité dans le processus de conception de la cabine de conduite des TGV futurs ---------- 37

2. LE PROJET DE CONCEPTION DE LA CABINE DE CONDUITE DES TGV FUTURS ---------- 41
2.1 Historique du projet de conception de la cabine de conduite des TGV futurs ---------- 43
2.2 Mise en place du projet de conception de la cabine de conduite des TGV futurs ---------- 44
2.3 Analyse du travail et étude du comportement de conduite du mécanicien : ---------- 51
2.4 Spécification des besoins liés à la conduite future ---------- 70
2.5 Bilan de la phase d'étude de faisabilité ---------- 82

3. LA DEMARCHE DE SIMULATION DE L'ACTIVITÉ EN PHASE DE DÉFINITION ET D'ÉVALUATION DES PRÉCONCEPTS ---------- 83
3.1 Objectifs ---------- 85
3.2 Méthode générale concernant la démarche de simulation en phase de définition des préconcepts ---------- 86
3.3 Le manipulateur de conduite ---------- 91
3.4 Le dispositif de vitesse butée ---------- 104
3.5 Les interfaces visuelles liées à la régulation de la vitesse ---------- 107
3.6 L'implantation des dispositifs ---------- 126
3.7 Les informations sonores en cabine ---------- 133
3.8 Discussion générale sur l'utilisation de la simulation en phase de définition et d'évaluation des préconcepts ---------- 142

4. MISE EN PLACE DES EXPÉRIMENTATIONS SUR SIMULATEUR D'ÉTUDE ET DE CONCEPTION ----------148
4.1 Le simulateur d'étude et de conception pour la conduite ferroviaire ---------- 151
4.2 Mise en place des expérimentations ---------- 160

5. PREMIÈRE SÉRIE EXPÉRIMENTALE : ÉVALUATION INTRINSÈQUE DU CONCEPT LIÉ À LA RÉGULATION DE LA VITESSE EN SITUATION DE CONDUITE SIMULÉE ----------166
5.1 Utilisation du manipulateur de conduite ---------- 170
5.2 Détection d'informations visuelles ---------- 197
5.3 Interprétation des alarmes sonores ---------- 203
5.4 Conclusion sur cette étape d'évaluation intrinsèque du concept lié à la régulation de la vitesse en situation de conduite simulée ---------- 212

6. DEUXIÈME SÉRIE EXPÉRIMENTALE : ÉVALUATION GLOBALE DU CONCEPT LIÉ À LA RÉGULATION DE LA VITESSE EN SITUATION DE CONDUITE SIMULÉE ----------215

6.1 Objectifs ----------217
6.2 Méthodes ----------219
6.3 Résultats ----------222
6.4 Discussion sur les résultats de la phase d'évaluation globale du concept lié à la régulation de la vitesse ----------238

7. DISCUSSION GÉNÉRALE SUR LA DÉMARCHE DE SIMULATION DE L'ACTIVITÉ PROPOSÉE ----------241

7.1 La démarche de simulation de l'activité ----------244
7.2 Limites de la simulation de l'activité dans les projets de conception. ----------249
7.3 Intérêt de la simulation pour les utilisateurs ----------251
7.4 Intérêt de la simulation pour les concepteurs ----------252
7.5 Intérêt de la simulation dans le projet de conception ----------253
7.6 Perspectives ----------254

8. CONCLUSION ----------258

9. BIBLIOGRAPHIE ----------264

10. TABLE DES MATIÈRES----------283

11. TABLE DES FIGURES ----------286

12. LISTE DES TABLEAUX ----------289

1. PROBLEMATIQUE

Aujourd'hui la compétitivité de l'entreprise tire son essence de l'innovation technologique tout autant que de sa capacité à la mettre en oeuvre et à l'intégrer dans la société. En effet, le progrès technique s'il ne se réduit pas à l'automatisation, permet d'innover, d'inventer des activités nouvelles, des marchés et du travail. Or jusqu'à aujourd'hui, on a plus cherché à utiliser les nouvelles technologies pour automatiser le passé au lieu d'inventer l'avenir (PORTNOFF, 1994), ceci au détriment de l'homme, qui dans une certaine mesure rejette cette notion de progrès. Il s'agit donc aujourd'hui de **redonner une place à l'homme**, tout autant qu'aux nouvelles technologies, dans le processus de **conception de produits nouveaux** et dans les systèmes de production. Ceci doit être rendu possible en intégrant systématiquement et explicitement le facteur humain dans les méthodes de développement (ROUSSELLE, 1997). Ainsi, les concepteurs pourront répondre de manière effective aux besoins des utilisateurs, ce qui favorisera l'acceptation des nouvelles technologies et constituera un réel progrès.

C'est dans cette optique, que s'est construit notre travail concernant la **conception du poste de conduite des futurs TGV** (Trains Grande Vitesse). En effet, dans un marché devenu concurrentiel, la société GEC Alsthom Transport de Belfort, a pris conscience de la nécessité d'intégrer un ensemble de nouvelles technologies au sein des futurs TGV. C'est ainsi qu'en 1991, elle a fait appel à l'ERCO : l'Equipe d'ERgonomie et de COnception de l'Institut Polytechnique de Sévenans (l'Université de Technologie de Belfort Montbéliard), pour intervenir dans la conception du poste de conduite des futurs TGV. La question initialement posée à l'ERCO se résumait à la simple prise en compte de normes en ergonomie et de données anthropométriques pour dimensionner le poste de conduite. Or cette démarche, qui est nécessaire à la conception, reste limitée quant à la prise en compte du facteur humain. Les ergonomes ont donc fait valoir aux concepteurs de GEC ALSTHOM, l'intérêt de connaître l'utilisation des produits existants, afin d'identifier les besoins et les dysfonctionnements relatifs aux dispositifs actuels en vue de la définition des futurs concepts. En effet, comme le soulignent FILIPPI et coll. (1995), la conception d'une situation de travail consiste rarement en la création d'une situation entièrement nouvelle, mais d'une évolution plus ou moins importante d'une situation existante. Une étape d'analyse de l'activité des conducteurs sur les postes de conduite existants a donc été mise en place à la demande de l'ERCO. Le groupe de travail s'est ainsi élargi en associant au projet, les membres de la SNCF concernés par les aspects cabine de conduite, ainsi que plusieurs conducteurs appartenant à différentes régions de France. Il s'agissait alors de définir, à partir de la **connaissance de l'activité de conduite**

actuelle, la place de l'homme dans le poste de conduite de demain ainsi que les dispositifs de conduite à concevoir. Comme nous le montrerons par la suite, l'analyse de l'activité actuelle menée avec les produits existants, a mis en évidence le rôle essentiel du conducteur lors de la régulation de la vitesse des TGV. Le groupe projet s'est donc donné pour objectif de concevoir un poste de conduite de TGV innovant, prenant en compte la **nouvelle philosophie de conduite**, en s'appuyant sur la définition du futur métier des conducteurs.

Pour mener à bien ce projet, nous avons mis en place, en accord avec les travaux de MALINE (1994), une démarche, que nous avons appelée **démarche de simulation de l'activité** . Cette démarche a consisté, comme nous le développerons par la suite, à :

- **modéliser**, sur la base des phases d'analyses, les situations de conduite de TGV futurs, en spécifiant le champ des activités futures souhaitables des conducteurs, notion que nous expliciterons par la suite,
- élaborer des **scénarios** liés à la conduite future, afin que chaque membre du groupe projet puisse se projeter dans la situation de conduite future, ceci dans l'objectif de rechercher des solutions en adéquation avec l'activité qui pourrait être menée,
- **simuler** certaines conditions d'exercice de l'activité lors d'expérimentations avec les conducteurs, afin d'animer les situations de travail et d'optimiser les solutions retenues.

C'est donc **une démarche de simulation**, au sens où celle-ci intègre, suite à l'étape d'**analyse** d'une situation de référence, une étape de **modélisation** du comportement du futur système homme/machine, une étape d'élaboration de **scénarios** ainsi qu'une étape dédiée aux **simulations**, qui permet de boucler de nouveau sur une étape d'analyse,... Nous l'avons qualifiée de démarche de simulation **de l'activité** dans la mesure où, lors de la simulation de **certaines conditions d'exercice de l'activité**, plusieurs conducteurs sont amenés à utiliser les futurs dispositifs de conduite sur bancs d'essais ou sur simulateur, nous permettant d'émettre des hypothèses sur l'activité qui sera menée en situation de conduite réelle.

Nous montrerons comment cette démarche, qui repose sur la prise en compte de l'utilisateur final du produit tout au long du projet de conception, permet de favoriser le développement de solutions innovantes, de les valider et de les faire accepter par l'ensemble des acteurs du groupe projet.

De part notre formation d'ingénieur en conception de produit et notre expérience dans le domaine de l'ergonomie, nous nous sommes positionnés, lors de la mise en place de cette démarche de simulation de l'activité, au carrefour des deux domaines que sont **l'ingénierie de produit et l'ergonomie**. Ce positionnement nous permet d'apporter notre contribution au domaine du **Génie des Systèmes Industriels** qui réunit ces différentes compétences.

Ainsi, cette démarche de simulation de l'activité des conducteurs de TGV, utilisée ici essentiellement dans un but de conception, pourra apparaître comme une démarche innovante pour les concepteurs. En effet, les différentes méthodologies de conception intègrent généralement la simulation des interactions homme-machine uniquement lors des évaluations-validations finales du produit.

Nous espérons que les ergonomes, quant à eux, verront cette démarche de simulation de l'activité comme un complément aux méthodes qu'ils mettent en oeuvre conjointement avec les concepteurs.

Dans la suite de ce premier chapitre, nous présenterons les différents constats qui nous ont amenés à mettre en place cette démarche de simulation de l'activité, compte tenu des méthodes de conception existantes, de la complexité du système étudié et des questions soulevées par la présence d'un conducteur en cabine de conduite ou en d'autres termes par la prise en compte de l'homme dans le processus de conception. En effet, lors de la définition du projet, nous nous sommes tournés vers les méthodes et techniques de conception applicables à des postes de conduite. Mais, comme cela sera mis en évidence dans la suite de ce document, nous n'avons pu obtenir lors de ces recherches que des réponses partielles à nos interrogations, dans la mesure où le système considéré est complexe et qu'il implique l'homme.

Nous nous sommes donc orientés vers les démarches et outils communs aux domaines de l'ingénierie et des facteurs humains, afin de mieux intégrer les différents points de vue des acteurs du projet et parmi ces outils, nous avons retenu la démarche de simulation de l'activité

telle qu'elle a été définie par MALINE (1994). En effet, simuler les conditions de réalisation de l'activité pour rapprocher les différentes représentations existantes parmi les acteurs d'une conduite de projet, est une raison générale qui justifie la mise en place d'une telle démarche. Beaucoup plus qu'une simple démarche de simulation de l'activité, elle devient une démarche de conception qui devient indispensable, quand la complexité de la situation envisagée fait que les méthodes habituelles de conception ne permettent pas d'en donner une image réaliste.

1.1 Apports et limites des méthodes de conception de produits.

1.1.1 Repères concernant la conception de produits

Si les objectifs de la conception de produits sont de satisfaire les besoins nouveaux éprouvés par un individu ou un groupe d'individus, la réponse à ces attentes d'utilisateurs se fait à travers **un produit**, c'est-à-dire, en accord avec BOCQUET (1996) : une pièce, un système physique, un matériel existant - un processus, industriel ou administratif - un service. Une des premières étapes de la conception de produit consiste donc à **analyser les besoins** des utilisateurs, à structurer ces besoins et à déterminer quel sera l'environnement futur du produit et les milieux extérieurs au produit. C'est ici que vont intervenir les différentes **méthodes et techniques de conception** qui doivent permettre de répondre à 4 questions fondamentales au cours du processus de conception :

? Que produire ?

? Pour quelle utilité?

? Quels doivent être les moyens les plus économiques et les plus efficaces?

? De quoi le produit doit être fait?

Ces méthodes de conception, mises en évidence par de nombreux auteurs (AOUSSAT, 1990 ; QUARANTE, 1994 ; BOCQUET, 1996), ont pour principal objectif d'aider les concepteurs à intégrer les différents outils, les démarches à mettre en oeuvre tout en formalisant le processus de conception.

L'approche séquentielle par exemple est très largement utilisée par les concepteurs, puisqu'elle contribue à la planification linéaire du projet dans le temps (Figure 1).

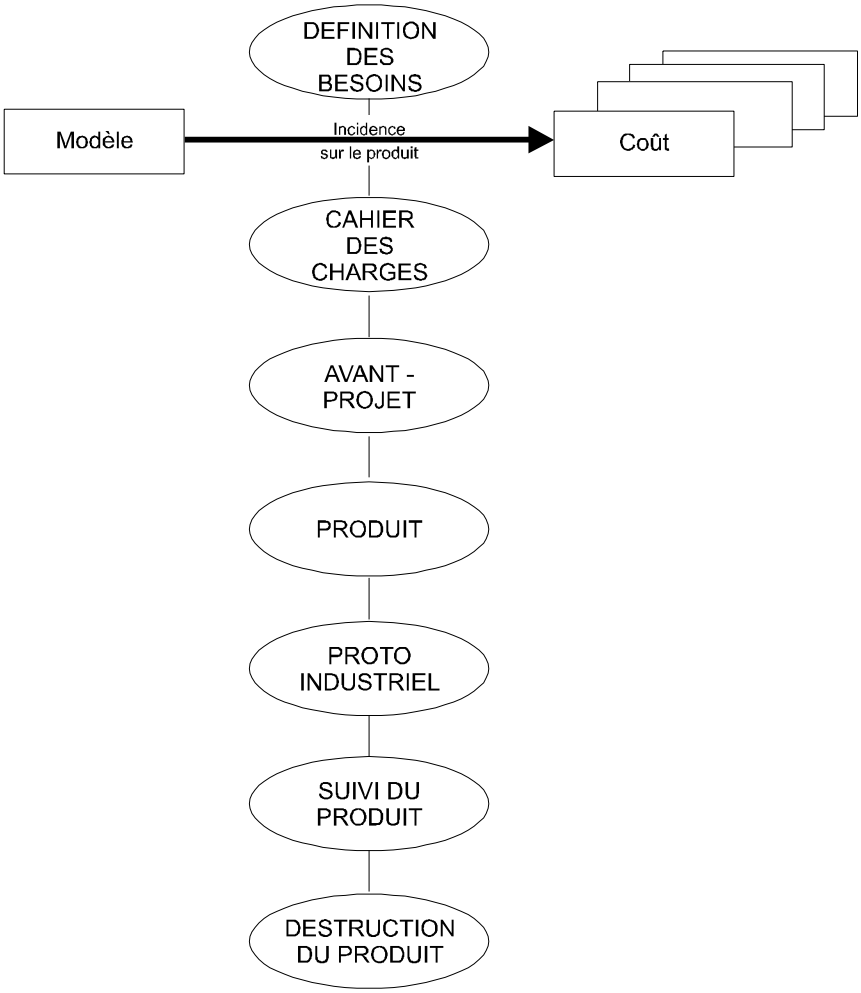


Figure 1 : L'approche séquentielle décrite par BOCQUET (1996).

Cependant tous les concepteurs sont aujourd'hui conscients que les activités de conception ne se déroulent pas suivant ce type de schéma linéaire, puisque de nombreuses rétroactions entre les différentes phases sont nécessaires avant d'aboutir à une solution finale acceptable.

C'est ce que l'on peut constater sur la Figure 2 qui donne une représentation simplifiée d'une méthode illustrée par AOUSSAT (1990), qui prend en compte une des nouvelles orientations de la conception : **l'ingénierie simultanée**. On comprend, en examinant son schéma méthodologique, qu'il est très difficile de décrire l'ensemble des boucles de rétroaction

possibles au cours d'un projet et qu'il importe en fait au concepteur de les mettre en place en fonction du sujet traité, des techniques, outils et démarches employés.

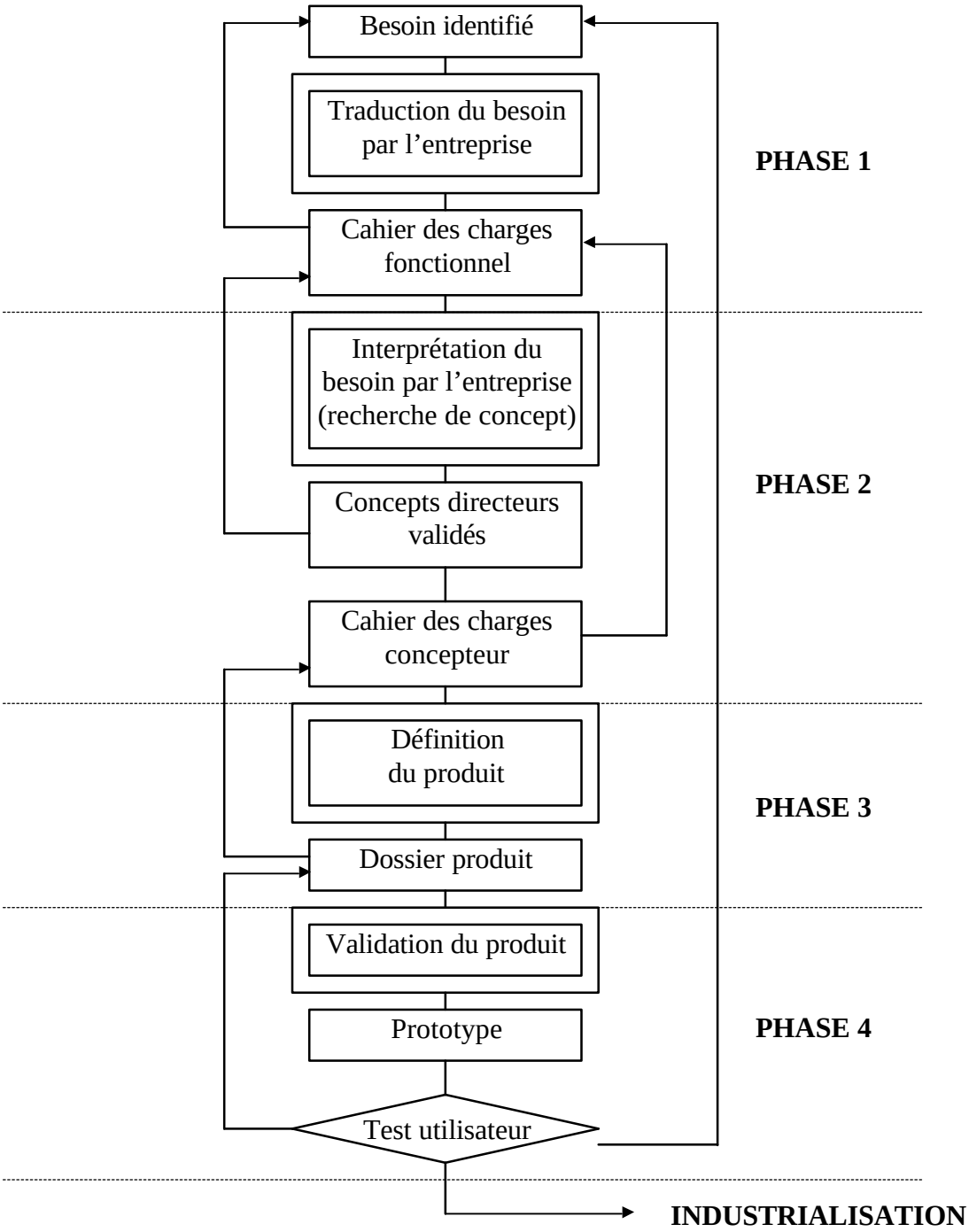


Figure 2 : Démarche de conception industrielle (AOUSSAT, 1990).

Il faut donc souligner qu'au-delà des méthodes mises en place, d'importants choix restent à faire concernant les activités de conception à mener. Pour aboutir au produit nouveau, il faut avant tout diriger, organiser et gérer le processus de conception (CHVIDCHENKO et

CHEVALIER, 1994), c'est-à-dire maîtriser à la fois les techniques de conception et le processus de conception La **conduite ou gestion de projet** va donc jouer un rôle très important dans la conception du futur produit. Ainsi, la **maîtrise des coûts, des délais et de la technique** se fait en utilisant au bon moment, des procédures et des outils. Or, il apparaît que l'orientation de l'activité de conception se déroule plus en fonction des différentes opportunités qui se présentent au responsable du projet que suivant le respect d'une méthodologie proposée. C'est ce que confirme GARRIGOU (1995) qui définit les principales caractéristiques de l'activité de conception de la manière suivante :

? l'activité de conception est réalisée à partir d'une grande diversité de données au niveau de la nature et de la forme,
? la définition du problème se fait progressivement tout en le résolvant. En effet, la définition du problème ne préexiste pas à sa résolution,
? une multitude de solutions est acceptable,
? l'activité de conception apparaît comme une démarche de planification hiérarchique (décomposition des problèmes en sous problèmes) mais aussi opportuniste (s'opposant à l'idée d'une succession strictement séquentielle et hiérarchique du déroulement des différentes phases du projet de conception).

Il est vrai que, sur la base des méthodes de conception qui sont proposées, les concepteurs sont amenés à décomposer les systèmes compliqués (automatismes, moteurs,...) en sous systèmes, jusqu'à l'obtention d'un problème simple. Or lorsque le produit est complexe, il existe des limites à sa décomposition en sous systèmes. Il faut, en effet, l'examiner à partir de méthodes issues de disciplines différentes, puisqu'il nécessite pour être appréhendé, d'être traité dans sa globalité au travers d'un faisceau d'approches. Ainsi, la mise en place de différentes méthodes qui apparaissent encore comme de simples moyens de formaliser les étapes des projets dans l'objectif d'aboutir au respect des coûts, de la qualité et des délais, ne permet que difficilement aux concepteurs d'appréhender la **conception des systèmes complexes**. Ces concepteurs sont alors naturellement conduits à ramener le problème à la conception technique du produit qui est alors soigneusement découpé suivant les systèmes techniques qui le composent. Mais l'examen du système complexe découpé en fonction des systèmes techniques qui le composent, élimine la prise en compte d'un grand nombre de facteurs lors du processus de conception. On va par exemple limiter l'étude des interactions

homme-produit, dans la mesure où le produit est décomposé suivant une multitude d'éléments dont on ne connaît pas les interactions avant les phases de validation.

Or, nous pensons en accord avec MOREAU (1994), que la maîtrise des systèmes complexes est la nouvelle dimension dans laquelle l'essentiel des progrès scientifiques va se faire dans les prochaines années et qu'il s'agit aujourd'hui d'aborder leur conception en prenant en compte toute leur complexité. ***Il s'agit donc de mettre à la disposition des groupes projet*** *non pas de nouvelles méthodes de conception dont les apports restent limités dans l'étude des systèmes complexes, mais plutôt* ***des moyens d'action dans la conception des systèmes complexes.*** Ainsi, mécaniciens, informaticiens, automaticiens et bien d'autres encore, appartenant à des domaines spécialisés, doivent étendre leur champ de connaissances lors des projets de conception, afin de ne pas être confrontés aux problèmes majeurs découlant d'une non prise en compte d'un grand nombre d'éléments, en particulier des facteurs humains.

Prenons l'exemple du TGV, objet de notre étude. Il est l'exemple classique d'un produit qui évolue au rythme des innovations technologiques et dont le développement a été assuré par un groupe projet à composante essentiellement technique. Si le défi technologique lancé par le constructeur a été relevé, puisqu'aujourd'hui on peut circuler à 300 km/h sur lignes voyageurs, de nombreuses questions restent posées concernant l'adaptation des moyens de travail en cabine de conduite. Les conducteurs confrontés aux nouvelles technologies, entre autres à l'apparition de l'informatique au poste de conduite, voient leur métier évoluer. L'automatisation de certaines tâches, les évolutions des contraintes futures dues à l'extension des lignes vers les autres pays européens, les évolutions des matériels, transforment le métier du mécanicien qui peut alors éprouver la peur légitime de ne plus avoir la maîtrise de son train, se sentant tributaire des automatismes nouvellement installés. Il se pose alors le problème essentiel de la sécurité lié à la place du conducteur dans le nouveau système.

Ainsi, il apparaît que les méthodes de conception restent à ce jour inadaptées ou difficiles à mettre en place, lorsque l'on aborde la conception d'un système complexe. Les méthodes actuelles conduisent trop souvent les concepteurs à découper le système étudié en sous systèmes techniques les amenant à une conception qui fait abstraction de la complexité du système étudié. Or, comme nous allons le montrer, il existe de réels dangers liés à l'orientation

purement technique des solutions dans la conception des systèmes complexes, dangers qui peuvent conduire à de véritables catastrophes lors de la conduite de tels systèmes.

1.1.2 Limites d'une conception technocentrée dans la conception des systèmes complexes

Si les concepteurs ont su tirer profit des nouvelles technologies, ainsi que des méthodes leur permettant de mieux formaliser les étapes de leurs projets de conception en vue d'apporter une solution technique performante, il reste de nombreux efforts à faire pour répondre aux besoins des utilisateurs.

Ce problème d'adaptation du produit à l'homme devient d'autant plus crucial qu'il va mettre en jeu des vies humaines (c'est le cas du TGV), notre environnement (c'est le cas du nucléaire) voire notre planète (problèmes liés à l'utilisation de l'ozone).

Durant les 30 à 40 dernières années, les révolutions technologiques dans la conception ont fait évoluer les tâches des opérateurs. En effet, comme le souligne REASON (1993), les systèmes sont :

? de plus en plus automatisés, éloignant l'opérateur des processus qu'il est censé contrôler,

? de plus en plus complexes et dangereux, l'informatique permettant d'accroître leur taille et leur complexité, et leur performance,

? mieux protégés des défaillances, mais ces systèmes de sécurité combinés avec l'erreur humaine peuvent engendrer de graves accidents, comme le montrent encore malheureusement les exemples de la catastrophe de Tchernobyl et de la navette Challenger,

? devenus opaques dans le sens où le système devient méconnu de l'opérateur et peut entraîner l'incompréhension par cet opérateur de ce qu'il va faire. De plus, le système automatique de défense peut cacher des pannes successives créant une illusion très préjudiciable à l'opérateur qui ne pourrait plus reprendre la situation en main, n'ayant pas la connaissance de l'ensemble du déroulement du problème.

Ainsi, l'opérateur, transformé en superviseur, s'est trouvé de plus en plus éloigné de son outil de travail qui devient de moins en moins maîtrisable. Un réel besoin est donc apparu quant à la conception des interfaces Homme-Machine (NICOLET et coll., 1989).

Or, les progrès restent essentiellement techniques en matière de sécurité (AMALBERTI, 1996), et sont effectués dans l'objectif :

? de réduire la fréquence des pannes et d'empêcher ainsi la survenue des erreurs humaines. Ceci implique des automatismes de plus en plus poussés et des développements en terme d'aide à la conduite pour tenter de « gérer » la performance de l'opérateur,
? de développer le retour d'expérience, à l'aide par exemple des « boîtes noires », et ainsi mieux estimer le risque de défaillance pour apporter les corrections nécessaires dans le futur.

Mais toutes ces techniques qui continuent d'améliorer la productivité, la performance et la sécurité pour des problèmes simples, restent totalement obsolètes en ce qui concerne les accidents graves, notamment concernant les systèmes complexes. « *Le mythe de la technique résolvant les problèmes de catastrophes semble s'essouffler aux confins d'un seuil de risque de x.10* $^{-6}$ *accidents graves.* » (AMALBERTI, 1996).

En fait, le concepteur, dans son approche technocentrée, cherche à la fois à banaliser l'être humain considéré comme l'élément faible en terme de fiabilité, mais paradoxalement, il cherche également à lui faire faire ce qu'il ne sait pas automatiser et a besoin de lui pour le cas où un scénario de défaillance n'aurait pas été identifié. Ainsi les solutions qui espéraient limiter le nombre des erreurs humaines : automatisation outrancière, redondance, procéduralisation extrême, surveillance externe et même formation visant l'erreur 0, restent inefficace. La justice a bien compris ce phénomène d'automatisation à outrance, et lorsqu'elle est aujourd'hui amenée à juger d'une erreur humaine lors d'accidents graves, elle n'a plus pour principale cible les opérateurs, puisqu'elle se tourne aussi vers les constructeurs et les exploitants. On montre enfin du doigt, qu'avec l'ensemble des développements techniques, le constructeur n'assure plus simplement son système contre le risque de panne, mais qu'il impose également la manière de conduire la machine, réduit au minimum le degré de liberté de l'opérateur pour dégager au mieux sa responsabilité (ce qui n'est pas prescrit est interdit). Il s'approprie et régente ainsi le métier de l'opérateur qui n'a plus le degré de liberté nécessaire pour pallier aux dysfonctionnements.

Il est donc temps pour le concepteur d'accepter l'erreur en cherchant à en diminuer les conséquences et en identifiant les réels facteurs de dysfonctionnement. *Il lui faut* ***prendre en compte l'homme tout autant que la technique pour résoudre les problèmes de fiabilité des systèmes homme-machine***. Ainsi, l'homme ne doit plus être considéré comme un facteur

limitant au niveau de la conception, mais comme un facteur dont la prise en compte va favoriser l'innovation (GUIDAT, 1997).

Afin de répondre le mieux possible à l'ensemble des besoins, les groupes de conception doivent s'agrandir en associant techniciens, ingénieurs, personnes du marketing, ergonomes,... On abordera ainsi le problème d'un point de vue plus global et non sous un seul de ses aspects. Nous pourrons ainsi parler d'une conception systémique de produits, au cours de laquelle les acteurs du groupe projet doivent intervenir de manière moins ponctuelle sur les produits et ceci, dès le début du processus de conception. La fiabilité reposera ainsi moins sur le calcul des risques, que sur la réelle intégration de l'homme dans la boucle de régulation. Nous allons donc voir comment cette intégration peut être réalisée en utilisant l'ergonomie dans le processus de conception.

1.2 Apports et limites de l'ergonomie en conception de produits.

1.2.1 Repères concernant l'ergonomie

L'ergonomie constitue un champ de recherches pluridisciplinaires et emprunte des connaissances à plusieurs disciplines comme la physiologie, la psychologie (en particulier la psychologie cognitive), la sociologie, l'ingénierie, la médecine du travail. Une définition reconnue de l'ergonomie, établie en 1988 par la Société d'Ergonomie et de Langue Française (SELF) est la suivante : « La mise en oeuvre de connaissances scientifiques relatives à l'homme, et nécessaires pour concevoir des outils, des machines et des dispositifs qui puissent être utilisés avec le maximum de confort, de sécurité et d'efficacité pour le plus grand nombre ». On peut résumer brièvement cette définition par : l'ergonomie c'est « **concevoir à l'usage de l'homme** ». L'ergonomie se décompose selon deux grands axes : l'ergonomie de correction et l'ergonomie de conception. La première s'applique à des produits, à des situations de travail existantes que l'on cherche à améliorer. La seconde s'applique à des projets de conception de produits nouveaux.

Entre 1950 et 1970, l'ergonomie était une **science appliquée**, c'est-à-dire que sur la base d'expérimentations et de statistiques, on modélisait les connaissances (WISNER, 1995). Cette conception de l'ergonomie est encore très largement celle de l'ergonomie mondiale, en particulier en Grande Bretagne et aux Etats Unis. En effet, cette approche normative facilite

l'usage de l'ergonomie dans l'Art de l'ingénieur, puisque les concepteurs n'ont pas à maîtriser de données spécifiques concernant le fonctionnement du corps humain, et cherche uniquement à appliquer un certain nombre de règles. De nombreux ouvrages et guides ergonomiques sont ainsi encore largement utilisés (WOODSON, 1954 ; VAN COTT et KINKADE, 1972 ; GRANDJEAN, 1983).

Mais l'analyse ergonomique de l'activité peut faire plus qu'aider l'ingénieur d'un point de vue normatif. Elle constitue une **méthodologie générale des sciences humaines** puisqu'elle va toucher aux moyens de réalisation de la tâche, mais également à l'organisation du travail, de l'entreprise, à la formation, à l'encadrement,... En effet, si son premier objectif était d'améliorer les conditions de travail en résolvant les problèmes liés aux nuisances physiques et physiologiques, l'ergonomie s'est ensuite intéressée aux interfaces homme-machine, c'est-à-dire aux interfaces entre les composants matériels et les composants humains (DE MONTMOLLIN, 1994). On a vu ainsi se développer l'approche de l'ergonomie francophone, qui dès les années 60, a consisté à aller mener des études en situation de travail réel. En effet, les premiers à avoir fait ces études avaient constaté de nombreux écarts entre la description des systèmes qui pouvait être faite par l'ingénieur et l'observation directe de la situation examinée par les chercheurs. OMBREDANE et FAVERGE (1955) publient un premier ouvrage de référence concernant l'analyse de l'activité telle qu'elle doit être mise en place et WISNER (1975) va rapidement en enseigner les méthodes et techniques au CNAM de Paris. Aujourd'hui, l'évolution des technologies et en particulier la présence de plus en plus forte de l'automatisme et de l'informatique dans la vie de tous les jours, fait encore évoluer l'ergonomie qui aujourd'hui intègre de plus en plus les facteurs liés à la charge mentale. L'ergonomie est devenue cognitive, c'est-à-dire relative aux " processus d'acquisition, d'utilisation, d'organisation des connaissances, au rôle du savoir et de la compréhension sur les activités" (SPERANDIO, 1988).

Mais les objectifs de tous les ergonomes sont les mêmes : *il leur faut nécessairement identifier les logiques des utilisateurs, les contextes dans lesquels se situent leurs actions, et les buts qu'ils poursuivent* (DANIELLOU, 1987), ceci dans l'objectif ***d'adapter les dispositifs en relation avec l'activité réalisée.*** En effet, la logique du concepteur (coûts, qualité, délais) n'est pas la même que celle de l'utilisateur dans la mesure où leurs buts sont apparemment différents. C'est donc l'ergonome qui va devoir défendre le point de vue de l'activité au sein

d'une équipe de conception avec pour contraintes prioritaires le ***respect de la sécurité du confort et de la santé des utilisateurs afin de pouvoir assurer une réelle efficacité du dispositif technique.***

Dans l'objectif de respecter ces dernières contraintes, on voit ainsi les concepteurs admettre progressivement la réelle nécessité de la collaboration entre ingénieurs et ergonomes. Il s'agit aujourd'hui de continuer à promouvoir une ergonomie de conception « globale, pluridisciplinaire et participative » (DE KEYSER et VAN DAELE, 1988), de manière à la rendre effective au début de chaque projet de conception intégrant l'homme. Elle peut en effet par la prise en compte des facteurs humains, permettre de rendre cohérents des domaines souvent présentés comme antinomiques, et aboutir à ce que DE TERSSAC et DUBOIS (1992) appellent une nouvelle forme de rationalisation.

Mais il faut souligner que comme pour la conception de produits, il n'existe pas « une méthode d'approche ergonomique qui soit universellement admise et standardisée » (SAGOT, 1996), même si il existe des étapes-clés à respecter pour le bon déroulement de l'intervention ergonomique et pour son intégration au sein des projets de conception. Ainsi, même si l'intégration de l'ergonomie dans les projets de conception semble être une chose admise par la plupart des concepteurs, elle reste difficile à rendre effective. Ceci peut alors se traduire par une mauvaise intégration des recommandations ergonomiques dans les phases de conception.

1.2.2 Limites liées à l'intégration des recommandations ergonomiques dans la conception de produits

JOURDAN et BELLIES (1996), rendant compte d'une intervention ergonomique qu'ils ont menée en milieu industriel, ont fait le constat suivant : « Le raisonnement des ingénieurs nous est apparu à la fois comme répondant à une logique rationnelle (connaissances et méthodes), et heuristique (obligation de résultats, tâtonnements, bricolage pour prendre en compte toutes les contraintes techniques et économiques, intégration des « bonnes idées de l'ergonome » ou des « choses vues » dans les situations de référence.) ».

En fait, l'ergonomie n'apparaît que rarement comme réellement intégrée aux processus de conception. On retrouve toujours cette idée d'ergonome conseil, qui va apporter quelques éléments complémentaires au projet. Ceci peut être dû au fait qu'il existe encore aujourd'hui plusieurs types d'interventions ergonomiques au sein des projets (DANIELLOU, 1992) :

L'ergonomie pratiquée par l'ergonome expert. Celui-ci **porte un avis** sur la définition des moyens de travail, à partir de ses connaissances propres. Il n'effectue pas ici l'analyse de l'activité menée par les opérateurs (ou utilisateurs) pour élaborer le pronostic sur l'activité future.

L'ergonomie pratiquée par l'ergonome fournisseur de qualité. Celui-ci **réalise l'analyse de l'activité** menée par les opérateurs (ou utilisateurs). Celle-ci est directement transmise au concepteur, sans participation des opérateurs ou des responsables de production aux choix des orientations. Le risque encouru est qu'il puisse ne pas avoir en main toutes les connaissances liées à la situation de référence. L'orientation des solutions risque alors de reposer sur la seule connaissance de l'ergonome.

L'ergonomie pratiquée dans la conduite de projets industriels.(DANIELLOU, 1987).

Ici, l'ergonome est placé comme un des **acteurs de la conception**. Il va s'intéresser à la conduite du projet dans son intégralité, de la phase d'analyse de la demande, jusqu'aux phases de validation, d'accompagnement de la réalisation et de mise en service. Cette intégration est nécessaire en vue d'apporter des concepts différents de ceux en vigueur chez les concepteurs. Elle s'appuie sur l'analyse ergonomique de l'activité dans des sites de référence ainsi que sur une approche participative des opérateurs dans le groupe projet. Elle favorise la construction des tâches futures des opérateurs.

L'ergonomie pratiquée suivant le programme technologique de PINSKY et THEUREAU. THEUREAU et PINSKY (1984), ont décrit sous le nom de paradoxe de l'ergonomie de conception le fait que l'on ne puisse pas adapter les moyens de travail à l'activité, dans la mesure où ces moyens de travail ont une influence directe sur l'activité future. Dans le cadre prospectif de l'ergonomie de conception, l'analyse ergonomique de l'activité, basée sur l'étude du comportement, ne peut être effectuée. Pour dépasser ce paradoxe, PINSKY et THEUREAU (1987) ont développé la notion **d'expérimentation ergonomique**, très efficace lorsque l'on dispose d'un prototype futur. Ici donc, en plus de l'accompagnement du projet développé par DANIELLOU, l'ergonome va créer des situations de travail et pratiquer des évaluations ergonomiques au travers d'expérimentations. DANIELLOU (1992) souligne que cette phase d'expérimentation est rendue possible par la caractéristique des projets mis en oeuvre : les développements informatiques. Cet auteur, qui effectue sa recherche dans des ateliers de production, a dû substituer à cette phase d'expérimentation un processus d'interactions entre concepteurs, opérateurs et ergonomes, visant à obtenir une description de

« l'espace des formes possibles de l'activité future » et un pronostic concernant les opérateurs et la production.

Pour que son action soit effective au sein d'un projet de conception, l'ergonome ne doit donc pas se contenter de la simple mise en évidence des limites liées aux opérateurs humains. Il doit être là pour que le groupe projet puisse avoir **une représentation juste de l'activité** future probable des opérateurs et contribuer aux recommandations concernant les tâches futures. RAMACIOTTI (1995) constate en effet que de plus en plus souvent l'ergonome se trouve à la fois dans le rôle du chercheur qui observe, décrit et modélise une activité de travail existante et dans celui du concepteur, qui transforme cette situation de travail.

Or, c'est ce passage de l'analyse du travail aux recommandations sur la future situation de travail qui demeure un point sensible en ergonomie. ROUSSEL et coll. (1994) soulèvent le problème de la liaison concepteur-ergonome lors de la prise en compte des recommandations ergonomiques. Le temps manque dans le projet de conception et donc, le temps d'acquisition par le groupe projet de la recommandation formulée par l'ergonome est trop court du fait des différences de langage et de point de vue. De plus, même si l'interprétation de la recommandation est bonne, elle peut être sous-estimée et mal pondérée par rapport à d'autres critères, du fait de sa nature si différente. La recommandation de l'ergonome se trouve ainsi rejetée, et toute l'analyse du travail est rendue de fait inutile. On retrouve ici l'explication de l'intérêt qu'ont des concepteurs pour l'ergonomie normative, qui apporte des recommandations reconnues et applicables rapidement.

Il est vrai que l'étape d'analyse de l'activité, n'apporte pas de réponse toute faite aux concepteurs. Dans le récent ouvrage sur l'analyse de l'activité (GUERIN et coll., 1994), cette étape est présentée comme un moyen permettant :

? de mieux connaître et d'expliquer les relations entre les conditions de réalisation de la production et la santé des salariés,

? de proposer des pistes de réflexion utiles pour la conception des situations de travail.

Les auteurs nous proposent de nombreuses techniques liées aux mesures et aux relevés sur le terrain permettant de réaliser l'analyse de l'activité, mais ils ne peuvent pas réellement expliciter la manière dont on pourra intégrer les résultats de ces analyses pour la conception. En fait, tant que l'ergonome ne se positionnera pas en tant que co-concepteur, au cours du projet de conception, les résultats issus de l'analyse de l'activité ne seront intégrés par le groupe projet qui ne sera pas forcément les exploiter.

Suite à ces différents constats, le groupe projet TGV s'est posé la question suivante : **«comment intégrer les différents résultats des analyses préalables en vue d'établir le meilleur compromis au niveau de la cabine de conduite finale, et de répondre aux attentes des industriels, des exploitants et des conducteurs ?»** Etablir une solution acceptable par tous s'avère en effet complexe, car chacun des acteurs se construit sa propre représentation du problème et donc sa propre solution sans réussir à réellement prendre en compte les recommandations des autres membres du groupe projet (ARNOULD, 1995). Les méthodes de conception générales ne permettent pas toujours de créer la cohésion nécessaire au sein des groupes projet, car chaque produit à concevoir possède ses propres caractéristiques nécessitant une démarche particulière. La mise en place d'une démarche de conception simple et applicable à toutes sortes de produits intégrant des domaines de compétence multiples reste utopique. Nous avons donc cherché la réponse en examinant les outils communs, transversaux par rapport aux différents domaines de compétence, et en particulier aux domaines de l'ingénierie et de l'ergonomie.

1.3 Les outils communs pour la prise en compte du facteur humain et des facteurs techniques

Le succès d'un projet de conception d'un produit complexe intégrant l'homme, repose nécessairement sur la mise en place d'un travail de groupe pluridisciplinaire incluant l'ingénierie et l'ergonomie, afin de mieux prendre en compte les aspects techniques et les facteurs humains. La fusion de ces deux domaines doit être rendue possible par la mise en place d'outils de conception et d'analyses communs qui permettent à chaque acteur d'aborder le projet selon tous ses aspects. En effet, l'utilisation d'outils communs au sein des groupes projet permet de disposer d'un support de travail adapté à la démarche de conception : pour que les recommandations des ergonomes soient prises en compte par les ingénieurs et pour que les ergonomes apprécient les contraintes qui pèsent sur les concepteurs.

De tels outils, qui permettent de diriger l'action de tous vers un même but : le meilleur compromis possible au niveau du produit final, ont été d'ores et déjà mis en place dans plusieurs domaines. En effet, LEPLAT (1985) montre l'approche mise en place par l'ergonomie et la psychologie cognitive pour traiter de la fiabilité humaine. Il dresse un bilan des méthodes telles que les arbres de défaillance, qui permettent d'extraire l'information utile de l'erreur ou de l'accident qui peut en résulter. Des applications de ces méthodes s'effectuent

parallèlement aux études de fiabilité des dispositifs (FADIER, 1990 ; FADIER et coll., 1991) pour donner lieu à des méthodologies communes entre fiabilistes et ergonomes qui trouvent de réels intérêts à cette mise en commun (NEBOIT et coll., 1990).

MILLOT (1988) s'intéresse à la supervision des procédés automatisés et à l'ergonomie en présentant les différents types de coopération homme-calculateur dans des tâches à forte composante décisionnelle (gestion des alarmes, dysfonctionnements, diagnostics,...). Les différents principes sont évalués à la fois suivant les critères techniques liés à la performance du système, et selon des critères ergonomiques concernant en particulier l'évaluation de la charge de travail de l'opérateur.

MAZEAU et CHRISTOL (1995) mettent en relation les résultats de l'analyse fonctionnelle de l'ingénierie et ceux de l'analyse du travail effectuée par l'ergonome, appelée aussi analyse opérationnelle. Ils constituent ainsi des graphes à deux entrées : fonctions à remplir / situations rencontrées. Ainsi, la définition des fonctions pour un système est précisée et validée en fonction de la manière dont il va être utilisé dans la future situation de travail. Les interfaces sont alors organisées pour aider l'opérateur à repérer à quelle situation particulière il doit faire face, afin d'aller plus facilement au but visé.

MALINE (1994) propose d'utiliser des outils de simulation communs aux domaines de l'ingénierie et de l'ergonomie. C'est cette démarche de simulation de l'activité qui a retenu toute notre attention, dans la mesure où nous avions à réaliser une étape d'évaluation importante au niveau des dispositifs futurs et que cette démarche est décrite comme favorisant la conduite du projet tout au long de son déroulement.

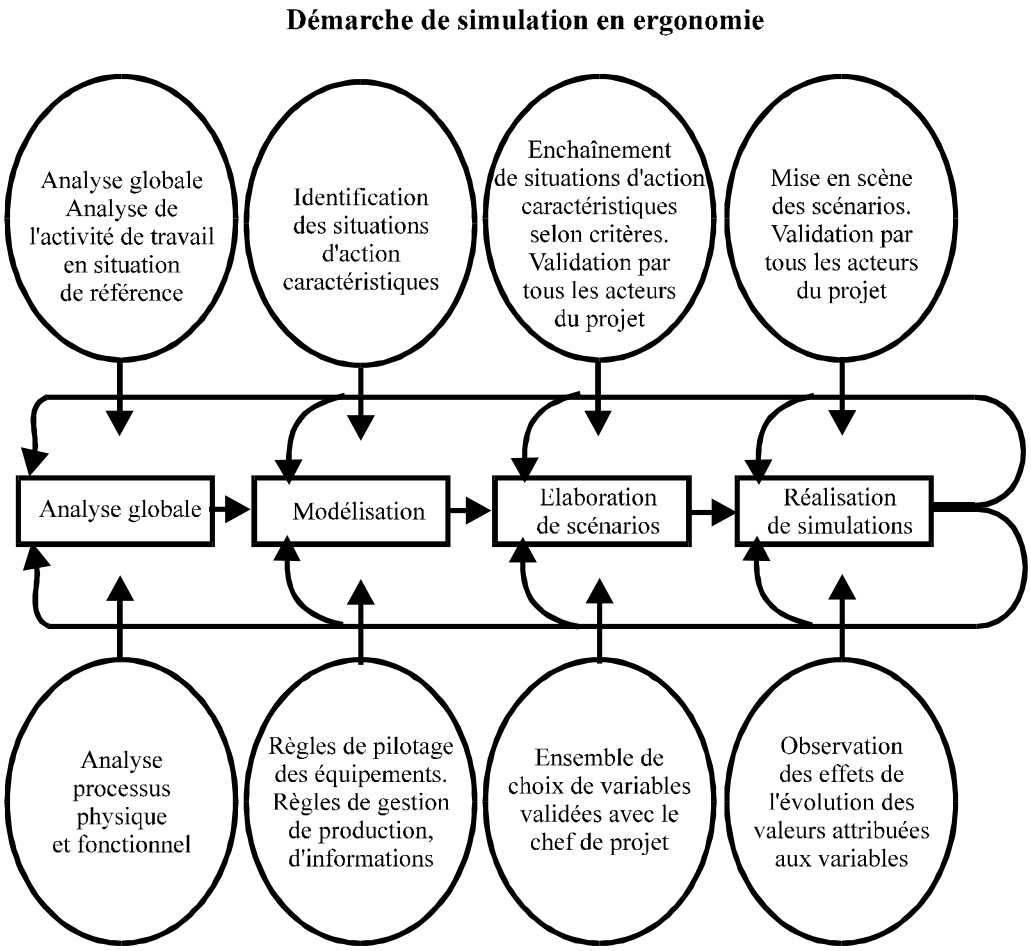
1.4 Simuler le travail : une aide à la conduite de projet (MALINE, 1994)

L'ouvrage de MALINE (1994) fait l'hypothèse que simuler les conditions de réalisation de l'activité des opérateurs futurs, au cours de projets de conception de systèmes de travail est un moyen performant pour faire évoluer les différences existantes entre les représentations des acteurs du projet, pour faire ressortir les interrelations entre les divers aspects du projet et finalement pour obtenir une meilleure intégration de l'ensemble.

En effet, toute activité peut être représentée par des algorithmes, des modèles théoriques, qui reproduisent ou résument le comportement du modèle de la réalité. La simulation a alors pour rôle de faciliter l'utilisation de modèles de tous ordres, en donnant les moyens à l'utilisateur de découvrir des domaines hors de sa spécialité. On va observer le comportement d'une reproduction artificielle, du modèle et du phénomène que l'on désire étudier lorsque l'on fait varier expérimentalement les actions que l'on peut exercer sur eux. On en déduit alors ce qui se passerait dans la réalité sous l'influence d'actions analogues. Il est clair que le meilleur simulateur est le système étudié lui-même, néanmoins la simulation s'impose dans de nombreux cas pour:

? réduire les coûts d'immobilisation d'un système existant,
? limiter les risques liés à l'expérimentation (arrêt d'urgence, accident,...),
? augmenter la fréquence des expérimentations,
? permettre l'expérimentation dans des conditions extrêmes identifiables et reproductibles.

Pour MALINE (1994), deux démarches de simulation concourent à la conception d'un système de travail : celle développée par l'ingénierie et celle avancée par l'ergonomie. Ces deux démarches que l'on peut trouver conjointes dans les étapes du processus de conception, ont des similitudes méthodologiques ainsi que des complémentarités (Figure 3), mais présentent également de grandes différences d'objet et d'applications.


Démarche de simulation en ergonomie
Analyse globale Analyse de l'activité de travail en situation de référence
Identification des situations d'action caractéristiques
Enchaînement de situations d'action caractéristiques selon critères. Validation par tous les acteurs du projet
Mise en scène des scénarios. Validation par tous les acteurs du projet
Analyse globale
Modélisation
Elaboration de scénarios
Réalisation de simulations
Analyse processus physique et fonctionnel
Règles de pilotage des équipements. Règles de gestion de production, d'informations
Ensemble de choix de variables validées avec le chef de projet
Observation des effets de l'évolution des valeurs attribuées aux variables
Démarche de simulation en ingénierie

?

Figure 3 : Comparaison de deux démarches de simulation (MALINE, 1994).

? La démarche de simulation pour l'ingénieur consiste à construire une représentation de la réalité d'un système pour appréhender son comportement futur. Le concepteur va définir son futur produit sous forme de recommandations fonctionnelles et construire des modèles de comportement du système. Lors de la simulation, à partir de différents scénarios, ou plans d'essais précédemment définis, il détectera les écarts entre le fonctionnel prévisionnel et l'effectif, en vue de **limiter les biais techniques** liés au futur système.

? Lors de simulations en ergonomie, c'est moins le comportement du système technique à concevoir qui est visé, que l'anticipation des contraintes opératoires, des risques potentiels d'incidents et d'accidents (POMIAN et coll., 1997). Les enjeux de la simulation de l'activité sont de donner des moyens efficaces au groupe projet, pour parer

aux réductions opérées par les modèles fonctionnels et faire évoluer les représentations des acteurs de la conception. En effet, lors de la conception d'un produit nouveau, l'ergonome élabore un scénario concernant l'utilisation future de ce produit et donc définit la tâche, compte tenu de la reformulation des besoins et des objectifs fixés par le groupe projet. Lors de la simulation, il définit des besoins en examinant des modes d'utilisations particuliers, en relevant des dysfonctionnements (différences relevées entre la tâche prescrite et l'activité réelle) et des indicateurs de performance du système homme-machine. La simulation est donc importante pour les ergonomes, parce qu'elle leur permet de **confirmer des hypothèses définies lors des analyses préalables**, hypothèses qui ne peuvent pas être vérifiées par d'autres méthodes d'acquisition de données et d'analyse. Ainsi, comme le souligne MALINE (1994) : « Il apparaît maintenant que le domaine dans lequel l'ergonomie est le plus en devenir concerne les méthodes lui permettant d'émettre un avis pronostic sur une situation de travail projetée ou en phase de conception ».

La démarche de simulation de l'activité situe également son intérêt dans l'accompagnement global du projet. Elle ne constitue pas un projet dans le projet. C'est une démarche opérationnelle d'aide à la décision. Les outils de simulation mis en place permettent à l'ergonome de simplifier et d'augmenter le nombre d'allers retours entre la définition initiale des différents concepts et leur conception (Figure 4), ceci dans l'objectif d'optimiser le concept final retenu.

On trouve ainsi trois phases dans la démarche de simulation de l'activité de l'ergonome :

- une phase d'analyses préalables (analyse des données du projet, analyse des tâches à réaliser et de l'activité réalisée lors d'une situation de référence,...). Cette étape donne lieu à une certaine forme de modélisation de l'activité lors de la description de situations d'actions caractéristiques,
- une phase projective, qui va correspondre à l'élaboration des différents scénarios, lors de la recomposition temporelle des situations d'actions caractéristiques,
- une phase prospective durant laquelle se déroulent les simulations qui vont permettre d'établir des pronostics permettant d'aider les concepteurs dans les choix de conception.

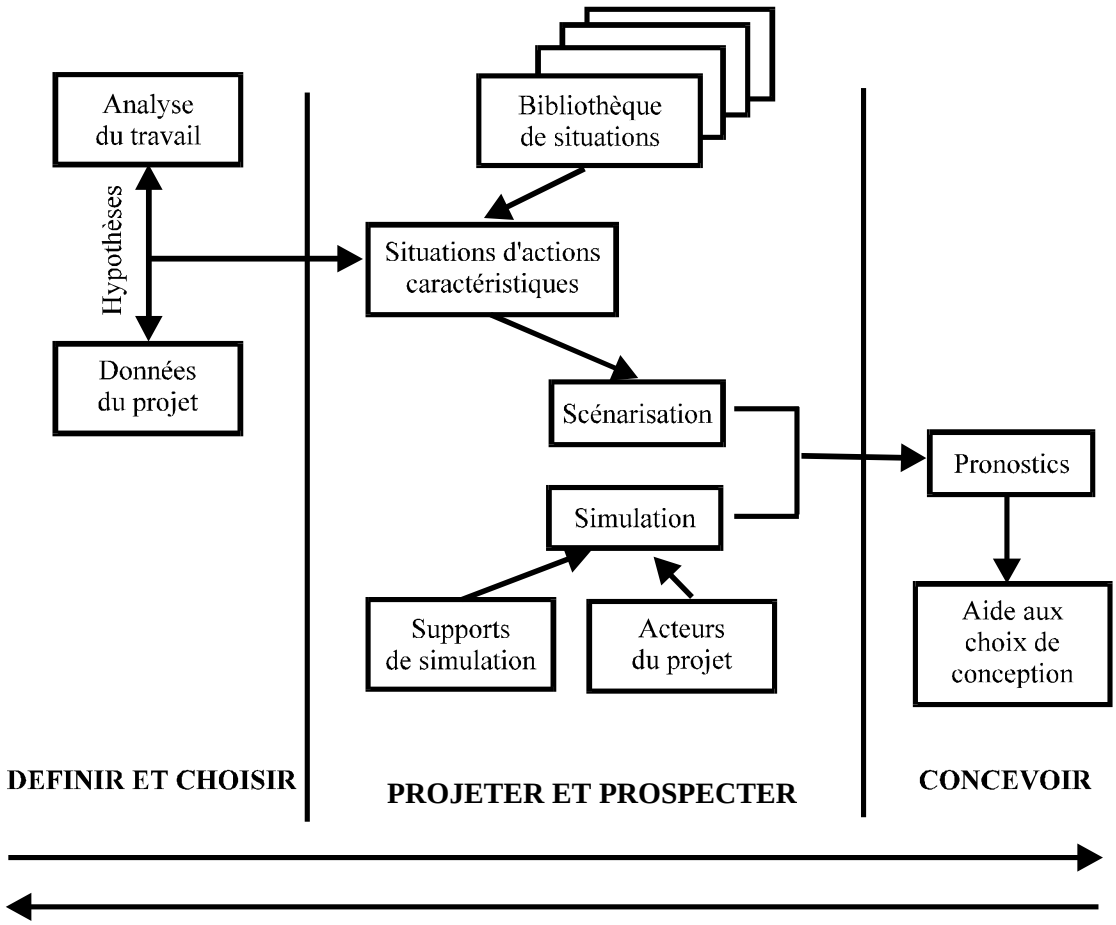


Figure 4 : La démarche de simulation de l'activité en ergonomie au cours d'une conduite de projet (MALINE, 1994).

En guise d'ouverture à son ouvrage, MALINE (1994) invite les lecteurs à voyager, grâce à la démarche de simulation de l'activité, à l'intérieur d'un monde nouveau de conduite de projet. Un monde où le processus de conception et le pilotage, qui sont les deux composantes interdépendantes du projet, convergeraient tous les deux vers l'innovation technique, économique, sociale et organisationnelle.

Un monde où le processus de conception évoluerait vers de nouveaux modèles au travers de :

- l'intégration de la signification sociale du travail dans le processus de conception,
- l'intégration de l'ergonome et non des normes dans le projet, afin de ne pas concevoir pour des opérateurs « standardisés »,
- l'intégration de la complexité sur la base de la représentation de situations plus proches de la réalité,

- ? la structuration dans l'acte de conception par l'élaboration de scénarios,
- ? l'élargissement du registre de « l'envisageable », dans le cadre de situations de travail complexes, par la référence à la réalité,
- ? l'évaluation anticipée des situations de travail futures dans un but de meilleure efficacité et pour éviter d'éventuels coûts d'investissements qui s'avéreraient injustifiés.

Un monde où de nouvelles formes de pilotage de projet seraient au service de l'innovation. En effet :

- ? la démarche de simulation de l'activité serait une source d'argumentations fondées permettant une confrontation efficace entre les différents acteurs et serait un moyen performant pour fédérer les points de vue et aboutir ainsi à une meilleure intégration de l'ensemble,
- ? la structure participative permettrait d'intégrer au sein du processus de décision l'organisation de la validation des compromis à effectuer. Cette démarche bousculerait l'approche classique qui consiste à dissocier les fonctions de conception de celles d'exécution,
- ? l'oeuvre de conception et sa conduite ne pourraient alors s'instaurer qu'au cours d'un processus de médiation entre des exigences humaines, technologiques, financières et économiques. Simuler ce n'est pas forcément formaliser. C'est également et surtout, se donner les moyens, dans une conduite de projet, de tirer profit d'une démarche projective et prospective,
- ? l'incertitude ne serait plus ici exclusivement considérée comme une gêne ou un handicap, mais comme une donnée constructive. L'enjeu n'est pas d'analyser avec précision les relations complexes qui existent entre un opérateur et une tâche, ni de donner une représentation exacte de la réalité à concevoir. C'est en revanche sur une image approchée de ces relations qu'il s'agit d'envisager leurs évolutions.

Ainsi, MALINE (1994) nous présente la démarche de simulation de l'activité comme une aide à la décision lors de la conduite d'un projet, visant la conception de situations de travail compatibles avec l'ensemble des attentes de chacun des acteurs du groupe projet. Dans son ouvrage, il utilise de nombreux exemples concernant la phase projective durant laquelle le groupe projet élabore les scénarios, mais il reste très théorique lorsqu'il s'agit de présenter la phase de simulation proprement dite ainsi que la phase d'expérimentation. Mais quels outils de

simulation utiliser ? dans quelles situations ? quels sont les objectifs à atteindre ? à quel moment utiliser la simulation dans le cas d'un produit complexe ? quel type de réponses peut-on réellement apporter au groupe projet ? comment la simulation peut elle faire fédérer les acteurs du projet ?...Ainsi, un grand nombre de questions restent posées quant à l'utilisation de la simulation au cours d'un projet de conception. Ce sont les différentes réponses à ces questions que nous illustrerons dans la suite de notre travail, concernant la conception des dispositifs au sein des cabines de conduite des TGV futurs.

Dans un premier temps, avec l'objectif d'être guidés lors de la mise en place de notre démarche de simulation de l'activité, nous nous sommes donc intéressés aux applications actuelles de la simulation de certaines conditions d'exercice de l'activité sur les postes de conduite. Nous avons ainsi pu mettre en évidence que la simulation de certaines conditions d'exercice de l'activité ne reste que partiellement utilisée dans les projets de conception et n'apporte pas ainsi toutes les réponses attendues par les concepteurs.

1.5 Les applications actuelles de la simulation de certaines conditions d'exercice de l'activité de conduite

Les simulations qui intéressent les ergonomes concernent la mise en évidence de l'adéquation du système homme-machine et nécessitent donc l'implication de l'homme (utilisateur ou opérateur) dans les phases de simulations. Quand un ergonome parle de simulation, il se réfère à la simulation physique du système homme /machine, qui aujourd'hui ne peut se dispenser de la présence de l'homme. De nombreux simulateurs concernant les activités de conduite ont ainsi été développés et permettent aujourd'hui de mener plusieurs types de recherches. On peut distinguer dans la littérature, trois axes de recherche qui s'appuient sur l'analyse de la conduite en situations simulées :

- **des recherches portant sur l'étude du comportement de conduite.**

Les observations menées au cours de ces expérimentations ont essentiellement pour objet la **modélisation du comportement humain** en analysant les activités de conduite par grandes **fonctions physiologiques ou cognitives** (perception visuelle, attention, prise de décision,...). Cette approche psychophysiologique du comportement des conducteurs concerne essentiellement la **sécurité primaire** : comportements en situation d'urgence, stratégies de

conduite, effets de paramètres individuels comme l'âge, la fatigue,... On peut citer à titre d'exemple les travaux menés sur des simulateurs de conduite automobile liés : au contrôle du véhicule (GODTHELP, 1986 ; GODTHELP et KÄPLER, 1988 ; GODTHELP, 1988), à la mise en évidence des stratégies visuelles (POTTIER et coll., 1995), à l'évaluation de la charge mentale (WIERWILLE et GUTMANN, 1978 ; WIERWILLE, 1983 ; WIERWILLE et CONNORS, 1983 ; WIERWILLE et RAHIMI, 1985), au partage de l'attention (BROUWER et coll., 1991), à la conduite par temps de brouillard (MALATERRE et coll., 1991), à la fatigue des conducteurs (SKIPPER et WIERWILLE, 1986) ou encore à l'examen de conducteurs aux capacités physiques réduites (LING, 1991).

? **des recherches expérimentales pour l'évaluation de dispositifs.**

L'objectif de ces recherches est d'étudier l'influence de l'utilisation de nouveaux dispositifs (téléphones, systèmes de copilotage,...) sur la tâche principale de conduite. La simulation a alors pour objet l'évaluation des conséquences induites par l'introduction de nouvelles technologies (perturbation, prise de risque, gestion des priorités) sur le comportement du conducteur. Dans ce domaine, on trouve des études menées sur la lisibilité d'informations présentées sur écrans en phase de conduite automobile simulée (IMBEAU et coll., 1989), ainsi que différentes études concernant les téléphones de voiture (NILSSON et ALM, 1991 ; PACHIAUDI et coll., 1996), ou la présentation d'informations routières dans le véhicule (VERNET et coll., 1995). Il est à noter que ces travaux s'intéressent plus à l'évaluation d'un nouveau dispositif implanté dans un environnement existant, qu'à la prise en compte globale de ses interactions avec les éléments du poste de conduite existant, lors de sa conception. L'objectif ici est d'identifier le niveau d'acceptabilité de la solution proposée.

? **la formation.**

Le développement de simulateurs de formation a pour principal objet la mise en place de scénarios et de programmes de formation. L'objectif recherché est de minimiser les risques liés à l'utilisation de nouveaux systèmes par des novices ou de former les conducteurs expérimentés à de nouvelles règles de conduite. Des études sont par exemple menées sur l'acquisition des nouvelles connaissances par les conducteurs (O'HARA, 1990), sur la prédiction des capacités du futur système conducteurs-engin (PARK, 1992).

A ce jour, les axes de recherche de simulation précédemment cités ont permis de modéliser un certain nombre de fonctions comportementales (traitement de l'information, mémorisation, prise de décision,...), par rapport à des équipements ou stimuli spécifiques, apportant des

réponses précises à des questions pointues. Or, nous avons pu constater que très souvent le concepteur attend **une réponse plus globale** concernant les dispositifs nouvellement conçus.

L'idée que nous défendons ici est donc, comme le souligne MALINE (1994), de pouvoir mener conjointement l'évaluation de l'utilité et de l'utilisabilité des nouveaux dispositifs, en utilisant une démarche de simulation de l'activité, et ce dès les premières étapes de la conception. L'évaluation de l'utilité permettra de vérifier si le produit satisfait à l'ensemble des contraintes fonctionnelles et opérationnelles tandis que l'évaluation de l'utilisabilité concernera la qualité de l'interaction homme-machine, c'est-à-dire la facilité d'utilisation (SENACH, 1993). C'est ainsi que notre travail a consisté à mettre en place une démarche de simulation de l'activité au cours du processus de conception du futur poste de conduite des TGV futurs.

1.6 La démarche de simulation de l'activité dans le processus de conception de la cabine de conduite des TGV futurs

L'objectif de la démarche que nous mettons en oeuvre basée sur la simulation de certaines conditions d'exercice de l'activité, est donc de pouvoir mettre à la disposition des concepteurs, non pas de nouvelles méthodes de conception mais des **moyens d'action** favorisant **l'innovation et la créativité par une meilleure prise en compte du facteur humain**. Le but ici est de pouvoir concevoir des produits de qualité adaptés au mode de fonctionnement des utilisateurs, ces derniers devenant **co-concepteurs** à travers l'analyse de leur activité actuelle et future. Cette démarche se structure de la manière suivante.

Dès **l'étude de faisabilité,** le groupe projet doit acquérir une bonne connaissance du métier de conducteur TGV, sur la base d'une analyse fine de l'activité de conduite menée sur des TGV existants et du recueil d'un grand nombre de données précieuses relatives à la conduite : nombre de manipulations sur les commandes, temps de manipulation, stratégies de conduite,.... (SAGOT et coll., 1994). Au cours des discussions avec les membres du groupe projet, on relève un grand nombre d'informations concernant les évolutions futures du métier de conducteur, les attentes actuelles des conducteurs, les dispositifs en cours de développement,.... Ainsi, le groupe projet peut se construire progressivement une représentation commune du rôle qu'auront les futurs conducteurs et en déduire ce que nous avons appelé **le champ des activités futures souhaitables des conducteurs**, souhaitables en

termes de sécurité, de confort, de santé et d'efficacité (SAGOT et coll., 1997). Cette définition du champ des activités futures souhaitables amène ainsi le groupe projet à réfléchir sur : la place assignée à l'homme dans le futur système Homme-Machine - la répartition des tâches Homme/Machine - les éléments d'assistance informationnelle nécessaires à la conduite future et - les modifications à apporter aux dispositifs en cabine liés à la régulation de la vitesse. La définition du champ des activités futures souhaitables des conducteurs va ainsi s'appuyer sur un modèle de la situation actuelle pour modéliser la situation future. En effet, on peut ici parler de modèle dans la mesure ou le groupe projet peut construire, suite aux études préliminaires « une représentation des comportements d'opérateurs dans une situation de travail, et permettant d'agir sur cette situation » (MONTMOLLIN, 1995).

Dès lors, il s'agit de mettre en place des scénarios relatifs à l'utilisation des futurs dispositifs liés à la régulation de la vitesse afin d'en définir les caractéristiques fonctionnelles et techniques. Plusieurs préconcepts sont ainsi définis et évalués pour chacun des dispositifs, lors d'expérimentations sur bancs d'essais, avant que le groupe projet puisse retenir un concept global lié à la régulation de la vitesse. La phase de définition des préconcepts, au cours de laquelle ces expérimentations sont menées, constitue une étape importante de l'étude dans la mesure où c'est lors de cette étape qu'il persiste bien souvent des doutes au sein de l'équipe projet. C'est un moment privilégié au cours du processus de conception, qui engage des décisions qui peuvent parfois être irrévocables ou tout au moins difficilement modifiables. Les simulations mises en place, même si elles ne reproduisent que partiellement l'activité de régulation de la vitesse, doivent permettre l'obtention de spécifications techniques tenant compte de l'usage, par la mise en situation des personnes concernées par l'étude. On cherche ainsi à favoriser le dialogue entre les différents acteurs du projet (clients, utilisateurs, ingénieurs, ergonomes,...) et à innover en menant une réflexion commune, non plus autour des anciens concepts, mais autour de scénarios d'utilisation.

Les expérimentations doivent donc constituer pour tous l'élément central des discussions du groupe projet, en apportant des réponses précises sur l'utilité et l'utilisabilité des futurs produits. Elle pourra ainsi favoriser l'intégration des recommandations dans la conception du produit et permettre la validation par étapes successives de la faisabilité et du niveau d'intégration de la solution selon ses aspects fonctionnels et opérationnels.

Lors des études détaillées, nous mettons en place un simulateur d'étude et de conception, afin d'évaluer en situation de conduite simulée le concept global retenu concernant le concept lié à la régulation de la vitesse. En effet, dans le cadre du développement d'un produit complexe tel que le poste de conduite des TGV futurs, les enjeux liés à la sécurité ne permettent pas, dans un premier temps, de mettre en place des expérimentations sur le terrain avec les nouveaux dispositifs. La simulation de certaines conditions d'exercice de l'activité est donc retenue dans l'objectif de rechercher dans une certaine mesure la validation du concept global retenu. Le simulateur mis en place doit ainsi regrouper l'ensemble des commandes relatives à la régulation de la vitesse (commandes, interfaces visuelles, informations sonores), l'environnement visuel de la voie, l'ambiance sonore en cabine, et reproduire le comportement réel d'une rame de TGV. Ce simulateur d'étude et de conception permet ainsi d'observer, d'analyser, d'expérimenter des situations d'usage afin de concevoir et de valider les nouveaux dispositifs qui s'intégreront dans le poste de conduite des TGV futurs. Les évaluations doivent évidemment se dérouler avec les futurs utilisateurs : **les conducteurs de trains.**

La simulation de **certaines conditions d'exercice de l'activité** de conduite va ainsi permettre la validation d'un concept lié à la régulation de la vitesse des TGV futurs, mais elle doit également constituer en accord avec les travaux de MALINE (1994), un **élément moteur du projet de conception** du poste de conduite du TGV futur qui répondra ainsi de manière effective aux besoins des conducteurs.

Nous mettrons en évidence dans la suite de ce document comment la démarche de simulation de l'activité, intégrée tout au long de la démarche classique de conception de produits, constitue un facteur de réussite dans un projet aussi complexe que celui de la reconception de la cabine de conduite puisqu'elle permet :

- de faciliter le dialogue entre les différents acteurs du projet (clients, utilisateurs, ingénieurs, ergonomes,...) et ce, dès la formalisation des objectifs du projet,
- d'innover, en menant une réflexion commune autour de scénarios d'utilisation,

- de concevoir les nouveaux dispositifs liés à la régulation de la vitesse des TGV futurs et de les modifier au fur et à mesure des résultats obtenus lors des simulations,
- de valider par étapes successives la faisabilité et le niveau d'intégration des solutions, selon leurs aspects fonctionnels et opérationnels,
- d'optimiser et d'évaluer le concept final retenu lors de la mesure subjective et objective de la performance du système homme/poste de conduite,
- d'établir un compromis satisfaisant l'ensemble des acteurs du projet, en ce qui concerne le concept lié à la régulation de la vitesse des TGV futurs.

Après avoir brièvement décrit l'étude préliminaire telle qu'elle a pu être menée par le groupe projet en amont des phases de conception, nous montrerons comment la démarche de simulation de l'activité a été utilisée tout au long du projet et a pu constituer une véritable aide à la conduite du projet de conception des dispositifs liés à la régulation de la vitesse des TGV futurs.

2. LE PROJET DE CONCEPTION DE LA CABINE DE CONDUITE DES TGV FUTURS

2.1 Historique du projet de conception de la cabine de conduite des TGV futurs

La réalisation du TGV restera sans doute une étape importante dans l'histoire des transports français et dans celle du chemin de fer mondial. C'est à la fin des années 60 qu'est apparue la nécessité de construire une nouvelle liaison ferroviaire Paris-Lyon, qui a servi au lancement du TGV Paris Sud-Est (PSE). Celle-ci est partie des constats suivants :

✍ développement rapide de la concurrence aérienne et routière,

✍ saturation tant en trafic voyageurs que de marchandises des lignes classiques,

✍ faisabilité technique d'un train grande vitesse pouvant circuler à 250 voire 300 km/h.

Le projet TGV a donc été présenté aux pouvoirs publics en 1969, et la décision de réalisation a été prise en 1974. Les travaux de construction de la ligne ont commencé en 1976, pendant que le marché de 109 rames était conclu. Cette réalisation a permis, dès 1983, de relier Paris à Lyon en 2h, au lieu des 3h44 nécessaires auparavant. Cette réussite a donné lieu à la mise en service en 1990, du TGV atlantique desservant les grandes villes : depuis Paris, vers Le Mans, Rennes, Tours et Bordeaux. Aujourd'hui les lignes TGV franchissent les frontières : depuis Paris vers l'Angleterre, par la liaison du tunnel sous la manche, et vers Bruxelles-Cologne-Amsterdam avec le TGV PBKA.

Si la réussite technique du projet TGV permet aujourd'hui d'envisager la circulation de trains à 350 km/h et une extension des voies vers les pays européens, il s'agit maintenant d'apporter toute l'aide nécessaire au conducteur pour mener à bien sa tâche de conduite qui ne cesse d'évoluer. La SNCF et de nombreux autres exploitants dans le monde, ont compris que l'homme constitue l'un des maillons essentiels quant à la prise de décision dans la conduite des grands systèmes tels que les TGV. Il restera donc très certainement encore longtemps aux commandes de la machine.

Il s'agit donc pour les concepteurs de déterminer quel sera le poste de conduite de demain, tout en prenant en compte le facteur humain dès le début des projets de conception afin d'aboutir à des systèmes homme-machine cohérents, qui limitent les risques d'accidents. Il faut savoir que les conducteurs français sont d'ores et déjà amenés à conduire seuls, avec la responsabilité de 800 passagers, des rames de 70 millions de francs, sur des durées de parcours

atteignant parfois 7 heures. La question de la fiabilité du système homme - machine est donc aujourd'hui essentielle et nécessite une redéfinition globale du poste de conduite actuel (Figure 5).

Figure 5 : Cabine de conduite du TGV A.

Ainsi, le TGV de l'an 2000 (TGV Nouvelle Génération), deviendra européen et devra améliorer ses performances dans le domaine de la technique (puissance des moteurs, freinage, économie d'énergie,...), au niveau de l'environnement (nuisances sonores, recyclage,...), dans le domaine du confort (aménagement des voitures voyageurs, en confort cabine,..), mais également dans le domaine de la sécurité (matériaux, poste de conduite, signalisation...). La conception du futur poste de conduite des TGV s'est donc inscrite dans une large étude à l'instigation du consortium franco-britannique : la société GEC ALSTHOM transport.

2.2 Mise en place du projet de conception de la cabine de conduite des TGV futurs

2.2.1 Constitution du groupe de travail

Le groupe de travail, concernant le projet « Etude du poste de conduite des TGV futurs », a réuni dès 1991 :

- GEC ALSTHOM Belfort (concepteur, constructeur des motrices de TGV)
- la SNCF (l'exploitant, client, utilisateur) avec 6 conducteurs volontaires,
- l'Institut Polytechnique de Sévenans (l'Equipe de Recherche en Ergonomie et Conception).

Une longue collaboration s'est ainsi instaurée entre ces trois entités (Figure 6), en vue d'une meilleure prise en compte des besoins du client, des facteurs humains et des nouvelles technologies.

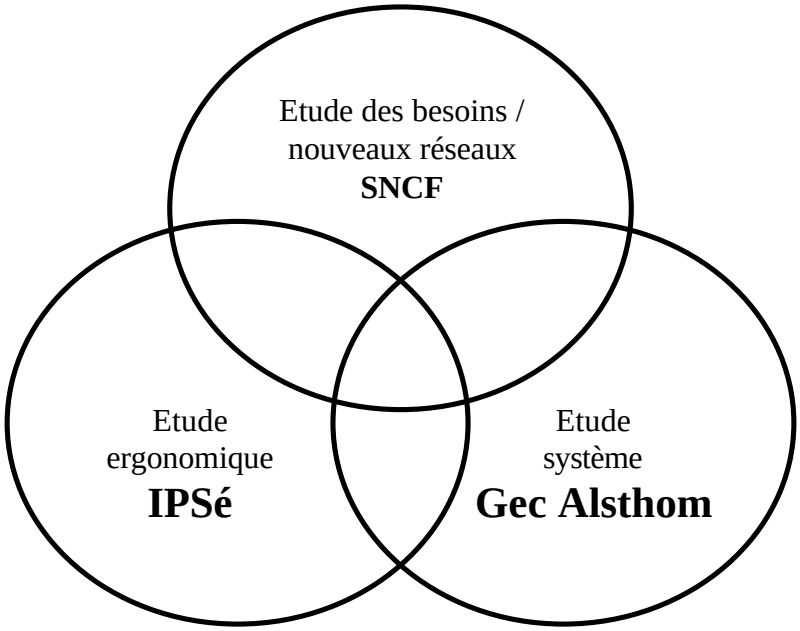


Figure 6 : Association clients, constructeurs, ergonomes.

Le programme établi étant très large, il a été décomposé suivant les trois axes suivants :

✍ **l'étude des besoins par rapport aux nouveaux réseaux, comprenant :**

✍ le cadre institutionnel en termes de formation, d'horaires, de mode de rémunération,...

✍ la spécificité des futurs pays traversés en termes de philosophie et d'habitudes de conduite, en termes de climat, de mentalité,...

✍ la mobilisation affective des conducteurs en termes d'anxiété, de fierté, de culpabilité, de solitude, ...

✍ **l'étude ergonomique comprenant :**

✍ l'étude de la tâche de conduite,

✍ l'architecture du poste de travail,

✍ l'étude de l'environnement en cabine de conduite,

✍ l'ergonomie cognitive pour les systèmes informationnels,

✍ la sécurité qui a fait l'objet d'une collaboration avec L'Université de Technologie de Compiègne, (GUYONNET et DIB, 1992).

- **l'étude des systèmes comprenant :**
- l'intégration du système, c'est-à-dire la connaissance de chaque équipement du système Contrôle-Commande du train (traction, freinage, systèmes auxiliaires, aides à la conduite, communication sol-train),
- l'interfaçage comprenant les interfaces électriques, électroniques, informatiques, mécaniques et pneumatiques.

La collaboration clients - conducteurs, concepteurs et ergonomes a permis de réunir les structures complémentaires nécessaires dans l'objectif de concevoir le futur poste de conduite des TGV. Or, comme le souligne DUCHAMP (1988), « La conception de produits et l'innovation ne sont efficaces que lorsqu'on arrive à sensibiliser ou à motiver des hommes et des structures complémentaires, conditions impératives pour qu'un produit réponde aux besoins de ses utilisateurs potentiels et aux attentes des personnels chargés de les fabriquer et de les commercialiser ». Nous nous attacherons donc à montrer dans la suite de ce document comment la prise en compte de l'activité des conducteurs, lors de la démarche de simulation de l'activité, a constitué le principal élément de motivation du groupe projet travaillant à la conception du futur poste de conduite du TGV.

2.2.2 Déroulement prévisionnel des recherches poste de conduite

La mise en commun des résultats, nécessaire à la mise en place du dialogue entre les différents acteurs, s'est faite tout au long du projet dont le premier programme est représenté Figure 7. On peut voir que le phasage du projet n'était pas initialement très précis, dans la mesure où la demande pouvait fortement évoluer en fonction des premiers résultats issus du bilan de l'existant. Quelques grands thèmes étaient déjà identifiés comme nécessitant une étude spécifique, mais les solutions à mettre en oeuvre n'étaient pas encore ébauchées. Ainsi, le groupe projet a pu mettre en place une démarche propre, qui n'a cessé d'évoluer au rythme des constats et des premières réponses liés au projet. C'est ainsi que la démarche de simulation de l'activité a pu progressivement être mise en oeuvre. La structure de groupe pluridisciplinaire, facilitant l'intégration de l'ensemble des acteurs à chaque étape du projet, a permis d'avoir une plus grande souplesse en termes d'objectifs à atteindre et de délais à respecter.

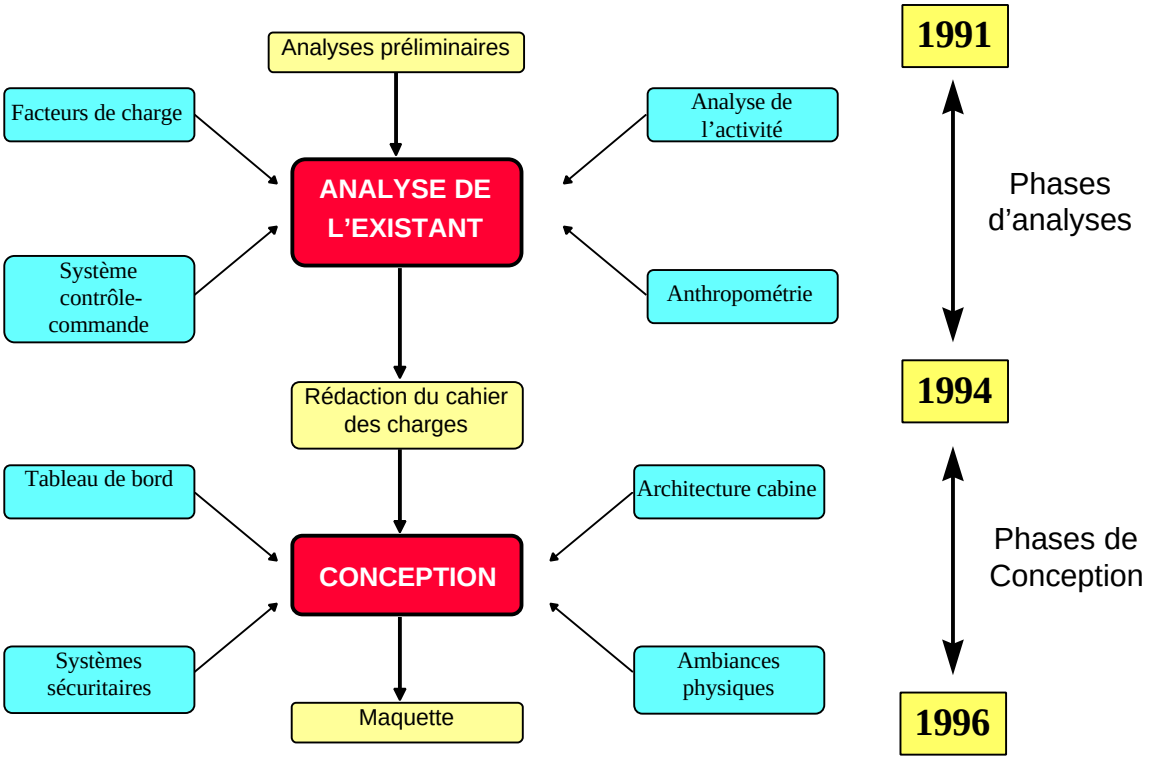


Figure 7 : Programme prévisionnel du groupe de travail poste de conduite des TGV futurs.

Il faut préciser ici que ce sont les études préliminaires, en particulier l'étude ergonomique, menée en amont de la phase conceptuelle, qui a permis au groupe projet d'aboutir à la définition du champ des activités futures souhaitables, base de la démarche de simulation de l'activité. L'utilisation de la simulation de certaines conditions d'exercice de l'activité, objet de notre travail, s'est ensuite faite dès les premières étapes de conception.

Il nous a donc semblé essentiel de rappeler les principaux résultats des cinq phases de l'étude ergonomique menée lors des phases d'analyse :

- **phase 1** : Anthropométrie et cabine,
- **phase 2** : Etude des facteurs de charge (d'ambiance et de travail physique),
- **phase 3** : Analyse du travail et étude du comportement de conduite du mécanicien,
- **phase 4** : Conception assistée par ordinateur. Préconcepts-concepts (outil CAO),
- **phase 5** : Conception de la future interface Homme-Machine.

2.2.3 Etude ergonomique menée lors des phases d'analyses

L'étude ergonomique qui a été menée lors des phases d'analyses, a donc été décomposée selon les cinq phases précédemment citées. Les phases 1, 2 et 3 se sont déroulées simultanément dans la mesure où les résultats obtenus sont complémentaires. Par contre, les

phases 4 et 5 ont été mises en place suite aux résultats de la phase d'analyse du travail et d'étude du comportement de conduite du mécanicien (phase 3). En effet, lors de ces deux phases, le groupe projet a du s'appuyer sur la connaissance de la situation de conduite avec les dispositifs actuels, que nous détaillerons spécifiquement dans le chapitre suivant.

A. phase 1 : Anthropométrie et cabine

Cette première étape a permis d'établir un bilan concernant les dimensions de la cabine (SAGOT et MAZET, 1991). Deux mannequins, représentant les $5^{ème}$ et $95^{ème}$ percentiles mondiaux (l'homme petit et l'homme grand), ont été définis et modélisés d'un point de vue géométrique à l'aide du logiciel de CAO Catia, Dassault Système. Ces mannequins (Figure 8 et Figure 9) ont été installés dans un modèle CAO de la cabine afin de pouvoir déterminer d'un point de vue théorique le positionnement optimal du futur mécanicien. Des outils tels que le volume d'atteinte, le volume de confort et le champ visuel ont été utilisés afin de définir le volume cabine optimal.

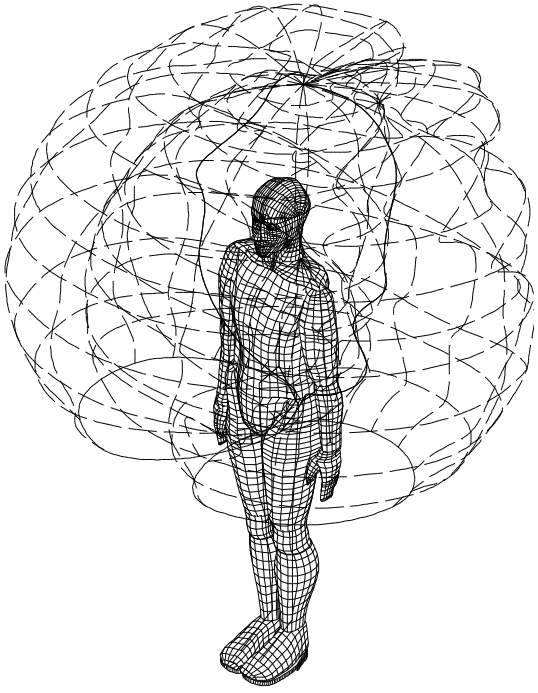


Figure 8 : Volume d'atteinte maximal des membres supérieurs du 95e centile masculin français (taille : 1,81 m).

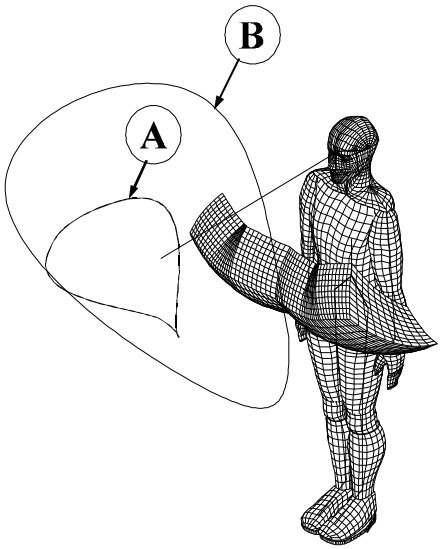


Figure 9 : Volume optimal de préhension du 95e centile masculin français et champs visuels central (A) et périphérique (B).

Cette approche dimensionnelle et normative de l'ergonomie, très employée en Grande Bretagne ou aux Etats Unis, apparaît comme étant une des approches les plus connues par les concepteurs. Celle-ci apporte en effet des réponses très concrètes, nécessaires en ergonomie de

conception. Cependant, cette approche est assez limitative, si elle est utilisée seule. Nous avons ainsi fait évoluer la demande initiale des constructeurs qui se limitait en cette unique phase d'évaluation. Les quatre autres phases du projet ont ainsi été réalisées en vue d'intégrer un maximum d'éléments concernant le métier du conducteur.

B. phase 2 : Etude des facteurs de charge (d'ambiance et de travail physique)

Cette étude avait pour objectif l'augmentation du confort psychophysiologique et la diminution des nuisances environnementales en cabine de conduite (SAGOT et coll., 1992 ; SAGOT et coll., 1993). La charge physique des conducteurs a été évaluée en termes de posture et de dépense énergétique. Au niveau de la charge environnementale, on a pu caractériser l'environnement physique auquel sont exposés les conducteurs, en termes d'ambiance thermique, acoustique, vibratoire ainsi que lumineuse.

C. phase 3 : Analyse du travail et étude du comportement de conduite du mécanicien

Les phases précédentes ont intégré une analyse de la tâche des conducteurs qui n'est restée que partielle dans la mesure où ce type d'analyse constitue à lui seul une phase d'étude. Cette phase d'analyse du travail et d'étude du comportement de conduite du mécanicien (GAVOILLE et coll., 1992 ; BOLLON et coll., 1992) est donc venue compléter les connaissances sur la tâche de conduite en intégrant l'ensemble des tâches liées à la prise en main du train, à l'apparition de défauts, aux relèves,.... Ce type d'approche est très complémentaire de l'approche purement normative de l'ergonomie. Très développé dans l'ergonomie de langue française, elle permet d'apporter un grand nombre de réponses sur le fonctionnement de l'Homme au travail et donc sur l'adéquation homme-produit-organisation. Le groupe projet a ainsi pu constituer un modèle de l'activité des conducteurs TGV qui a pu être comparé à l'activité réelle des conducteurs. Ceci a été rendu possible par la réalisation de films lors de 12 trajets en TGV, films qui sont venus appuyer les verbalisations des conducteurs.

D. phase 4 : Conception assistée par ordinateur. Préconcepts-concepts (outil CAO)

Avec la diversification et l'allongement des trajets TGV sur le réseau européen, il est devenu nécessaire de concevoir des postes de conduite répondant le mieux possible aux

critères de fabrication, de sécurité et d'ergonomie. Au cours de cette quatrième phase (BENCHEKROUN et SAGOT, 1992), l'utilisation des outils CAO (Conception Assistée par Ordinateur) a permis de définir le volume de la future cabine, le positionnement des commandes, le positionnement du conducteur européen au sein de la cabine. Ceci a été rendu possible par l'utilisation des représentations modélisées de l'homme à l'aide du logiciel de CAO CATIA et par la connaissance de l'activité de conduite actuelle. L'outil CAO, du fait des nombreuses contraintes à prendre en compte concernant l'espace de travail (inclinaison pare-brise, évacuation d'urgence,...), a fait gagner un temps précieux avant les validations anthropométriques finales sur une maquette à l'échelle 1, ainsi que lors du choix de l'implantation des dispositifs en cabine (BENCHEKROUN et coll., 1996 ; GOMES et coll., 1996).

Les principaux résultats ont permis de :

- ✍ positionner l'agent de conduite dans l'enveloppe interne de la cabine,
- ✍ de construire des préconcepts de pupitres,
- ✍ de définir les réglages du siège,
- ✍ de donner une architecture générale de la cabine,
- ✍ de définir des emplacements de dispositifs sur pupitre,
- ✍ de définir des emplacements d'appareils en cabine,
- ✍ de valider de manière générale le préconcept du poste de conduite futur.

E. phase 5 : Conception de la future interface Homme-Machine

Dans cette cinquième phase, le groupe projet a défini le champ des activités futures souhaitables (SAGOT, 1997), afin de pouvoir effectuer des propositions concernant la conception des dispositifs matériels et informationnels permettant le dialogue entre l'homme et la machine (GAVOILLE et coll., 1993; ROBERTY et coll., 1993 ; BENCHEKROUN et coll., 1994).

L'étude s'est décomposée en deux étapes :

? la formalisation de l'analyse de la tâche et de l'activité de conduite, qui a permis de mettre en évidence les facteurs déterminants à prendre en compte dans la répartition future des tâches Homme-Machine,

? la détermination de la tâche future. Celle-ci a conduit à définir différentes formes de solutions opérationnelles relatives à l'apport d'une aide à l'activité de conduite, à la conception de la nouvelle interface et à l'élaboration de moyens de travail adaptés aux mécaniciens et à la tâche.

Si les étapes d'études anthropométriques, d'étude des facteurs de charges et de définition des volumes par la CAO sont aujourd'hui présentes et souvent bien maîtrisées par les concepteurs, la partie analyse de l'activité des opérateurs reste une étape rarement intégrée dans les projets de conception. Or, cette étape, constitue une étape-clé dans les phases d'analyses, car elle apporte de nombreuses informations objectives sur l'activité des opérateurs et contribue à une meilleure connaissance de leur métier. De plus, la connaissance de l'activité actuelle a été déterminante pour définir le champ des activités futures souhaitables des conducteurs, étape essentielle dans la démarche de simulation de l'activité. Nous détaillerons donc, dans le chapitre suivant, comment s'est déroulée cette étape d'analyse de l'activité et dans quelle mesure celle-ci nous a conduit à appliquer une démarche de simulation de l'activité concernant les dispositifs liés à la régulation de la vitesse des TGV futurs. Nous montrerons également comment cette étape nous a permis d'orienter nos choix de conception sur la base des différentes analyses effectuées.

2.3 Analyse du travail et étude du comportement de conduite du mécanicien :

L'analyse du travail a pour origine les travaux d'OMBREDANE et FAVERGE (1955), qui se sont intéressés à ce qui est effectivement fait (dans le cadre du travail) et non pas seulement au « devoir faire ». Ils ont ainsi montré les apports liés à l'observation du travail, à son déroulement et à la manière dont il est fait. On a ainsi vu se constituer des liens forts entre les divers domaines de l'ergonomie s'appuyant sur l'analyse de l'activité qui peut être analysée suivant 4 composantes du travail :

? **l'analyse du travail en termes d'activités gestuelles** : elle consiste à décomposer le travail en séquences d'opérations, en phases, en gestes élémentaires, en manipulations, en déplacements, à examiner les temps de travail, les postures, les gestes,...

? **l'analyse du travail en termes d'informations** : ici, on cherche à déterminer comment l'opérateur fait pour traiter l'information, communiquer avec la machine,...

? **l'analyse du travail en terme de régulation** : il s'agit de décrire l'activité de l'opérateur qui va réguler des processus par ajustements successifs entre objectifs et réalisations.

? **l'analyse du travail en terme de processus de pensée** : elle consiste à mettre en oeuvre l'analyse détaillée de la tâche de l'opérateur (ce qui lui est prescrit), et l'analyse de l'activité de l'opérateur (ce qui est effectif). Ainsi, on peut chercher à mettre en évidence les processus de pensée, les représentations, les stratégies adoptées,....

Dans tous les cas, il est essentiel de bien connaître la tâche et l'activité des utilisateurs, dont nous allons préciser les définitions et caractéristiques.

2.3.1 L'analyse de la tâche et de l'activité

*** L'analyse de la tâche**

La tâche est ce qui est prescrit, ce qui est à faire, dans des conditions données. Il s'agit donc de recueillir un ensemble de données sur le système homme-machine, permettant de décrire la machine, l'opérateur, les informations et les actions. Selon SPERANDIO (1988), l'analyse de la tâche (ou analyse des conditions de travail) doit d'abord délimiter le système homme-machine sur lequel porte l'analyse : poste de travail, service, atelier,... Puis des informations sont relevées à plusieurs niveaux à l'aide d'observations, de questionnaires, de la lecture de documents, d'analyses statistiques,...

On dresse ainsi une vue d'ensemble de la situation existante à l'aide d'indicateurs simples, fournissant à l'équipe projet une base de travail. SPERANDIO (1988) conseille de partager les données recueillies en quatre classes :

? l'opérateur humain : les opérateurs, leur rôle dans le système, leurs connaissances, leur expérience, les horaires, les problèmes soulevés,...

? la machine : sa structure, ses composants, ses caractéristiques techniques, l'environnement, son fonctionnement,...

? les informations : l'ensemble des informations circulant entre les intervenants, entre/avec les différentes machines, ainsi que les caractéristiques de ces informations (formelles, informelles, précises, imprécises, permanentes,...),

? les actions : types d'actions, gestes, modes opératoires, régulation,...

Une collaboration étroite est donc souhaitable au niveau de l'analyse de la tâche entre opérateur, ingénieur et ergonome. En effet :

? Les connaissances de l'opérateur, basées sur la pratique et sur l'expérience qu'il a de diverses situations, lui permettent de donner des éléments quant à l'intervention la plus efficace à mener ou sur l'outil le plus adéquat à utiliser. Il peut également préciser quelles sont les tâches qui lui sont assignées.

? Les connaissances de l'ingénieur permettent d'avoir une vision « exacte » du système. Il connaît les fonctionnements, les comportements, les différents composants, les variables, leurs évolutions et les liens entre ces variables. Il connaît les informations utiles et peut contribuer à la définition de modes opératoires en fonction de sa connaissance du système.

? Les connaissances de l'ergonome vont permettre d'avoir une vision plus précise de l'opérateur humain. En effet, il va pouvoir définir quelles sont les exigences physiques et cognitives, les limites et ressources théoriques des opérateurs lorsqu'ils réalisent une tâche donnée dans un environnement donné. L'ergonome contribue ainsi fortement à la modélisation du système homme-machine.

*** L'analyse de l'activité**

L'activité apparaît comme une réponse de l'opérateur à l'ensemble des conditions de travail. C'est ce que le sujet met en oeuvre pour exécuter la tâche qui lui est prescrite (LEPLAT, 1985). L'activité peut s'appliquer sur des sujets matériels, sur les composantes physiques et, dans ce cas, son analyse sera descriptive. Elle peut également porter sur des représentations mentales, sur des mécanismes mentaux qui permettent de diriger les mécanismes comportementaux. Mais ceux-ci étant inobservables, l'activité pourra uniquement être inférée à partir de traces observables ou de manifestations. Il s'agit donc de dégager des méthodes d'analyse concernant la mise en évidence de la prise d'informations et des connaissances nécessaires à la réalisation de la tâche.

2.3.2 Outils et méthodes utilisés lors de l'analyse du travail des conducteurs de train

Les objectifs de cette phase étaient donc de :

✍ lister les facteurs déterminants de l'activité de conduite actuelle (types de lignes, TGV,...)

✍ lister les fonctions nécessaires du système de traction freinage sur la base du relevé des sous-objectifs et des stratégies mises en place concernant la régulation de la vitesse,

✍ lister les informations que l'interface devra forcément présenter,

✍ souligner les carences informationnelles du système actuel,

✍ lister les dysfonctionnements rencontrés.

Ceci a été rendu possible par :

? l'analyse de l'existant en terme de connaissance de lignes, de procédures,...
? l'étude des systèmes de communication sol-train existants et futurs (crocodiles, KVB, Préannonce, Cab signal, ASTREE),
? l'étude des documents de travail consultés par les mécaniciens avant le départ ou en cabine,
? l'observation et le recueil de verbalisations en situation réelle, lors de trajets effectués en cabine de conduite,
? les entretiens semi-directifs avec les six mécaniciens experts TGV du groupe projet,
? l'étude de la base de données des incidents (nature, fréquence, type de situation, type de ligne).

Les observations ont été obtenues à partir de 12 trajets en cabine, enregistrés sur bandes vidéo. Le travail réel effectué a pu ainsi être observé sur le terrain et analysé en différé en laboratoire. Pour l'analyse des films, trois méthodes ont été utilisées :

? l'observation des comportements et leur analyse statistique.
? l'analyse des modes de raisonnement des conducteurs au cours de verbalisations que les conducteurs ont effectué en visionnant les films réalisés.
? l'analyse comparative de la tâche et de l'activité à partir de verbalisations par scénarios et questionnaires.

Quatre caméras ont ainsi été installées en cabine pour enregistrer simultanément la voie ferrée, la posture du mécanicien, les informations du tachymètre et de son environnement proche ainsi que la direction des regards (Figure 10 et Figure 11). Ceci a été réalisé sur 12 trajets avec la participation de mécaniciens volontaires.

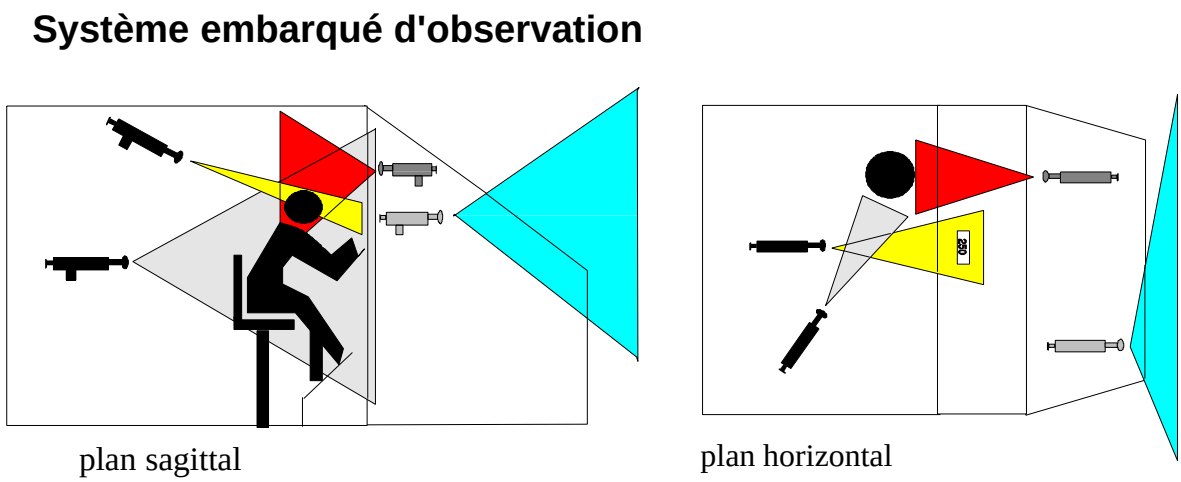


Figure 10 : Place et direction des caméras embarquées en cabine.

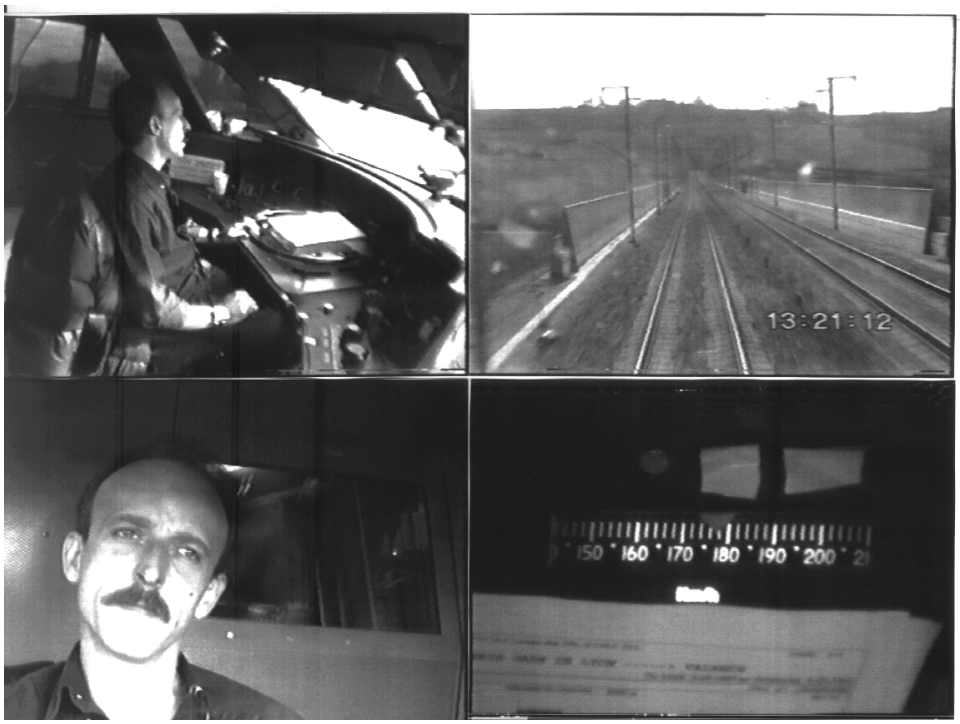


Figure 11 : Image obtenue après compression des images des 4 caméras en cabine.

Les résultats statistiques concernant l'observation de l'activité ont été obtenus à partir du logiciel élaboré par A. KERGUELEN : KRONOS, qui a permis de découper l'activité en actions élémentaires et de faire des comparaisons inter/intra individuelles et inter T.G.V. de l'activité de conduite des mécaniciens. Ce logiciel est un logiciel d'aide au recueil et à l'analyse de données d'observations systématiques, qui permet une simplification de la saisie des observations. Il fournit des analyses statistiques simples des états des variables observées (effectifs, durées, moyennes, écart type, ...), et il permet d'obtenir des graphiques sur :

✍ la distribution des durées de chaque catégorie de variables sous forme d'histogrammes,
✍ la répartition des effectifs et des durées totales des variables sous forme de camemberts.

On a ainsi pu effectuer des comparaisons de situations pendant la période d'observation, décrire l'activité visuelle mais aussi en trouver l'explication en la mettant en relation avec le contenu et le contexte du travail.

Les verbalisations obtenues à partir de films avaient pour principal objectif d'analyser les modes de traitements mis en oeuvre par les conducteurs de TGV. Les conducteurs impliqués dans l'étude commentaient ainsi en laboratoire les films réalisés lors des voyages en cabine. Les verbalisations étaient libres ou définies sur des zones particulières : densité de signalisation, forte activité,... Les ergonomes cognitivistes du groupe projet ont également fait verbaliser les conducteurs sur la base d'un film où conduisait un autre conducteur et sur une voie qu'ils ne connaissaient pas. Ceci a permis de mettre en évidence les différences relatives entre les stratégies de conduite des mécaniciens ou les problèmes soulevés par le manque d'expérience d'un conducteur sur une ligne. Une première modélisation de la connaissance des conducteurs et de l'activité de conduite a pu ainsi être constituée. Les verbalisations par questionnaires et scénarios, démarche complémentaire aux précédentes, avaient un double objectif :

✍ chercher, non pas à établir une liste exhaustive des différents paramètres susceptibles de générer des incidents, mais plutôt à mettre en évidence les différentes catégories d'éléments en interaction avec le système homme/machine et ensuite repérer celles qui tendent à diminuer le niveau de sécurité globale.
✍ s'intéresser, en particulier, à l'activité actuelle de régulation de la vitesse et à son évolution future.

2.3.3 Le travail du conducteur de TGV

Sur la base des analyses qui ont été menées, on peut dire que la tâche de conduite actuelle se décompose en trois phases successives à savoir : la prise de service avant départ, la conduite et le rangement de la rame à l'arrivée.

A. La prise de service avant départ

Elle se traduit concrètement par le passage au dépôt pour retirer différentes informations (documents sous format papier ou lecture du tableau d'affichage). Ces dernières retirées lors de la prise de service concernent essentiellement la connaissance et l'état des lignes. De manière

générale, ces connaissances sont relatives aux différentes limitations de vitesses (limitations permanentes ou temporaires), à l'implantation de la signalisation de voie et aux dernières modifications du règlement de conduite. A la suite de ce passage au dépôt, il y a ce que l'on appelle "la préparation de la rame". Cette préparation consiste d'une part à prendre connaissance de l'état de la rame en consultant soit le Guide de Dépannage Informatisé (GDI), soit un document sous format papier, et d'autre part à effectuer un certain nombre d'essais relatifs aux tests de fonctionnements de différents équipements (traction, freinage, signalisation en cabine, ...). C'est à la suite de ces essais que le mécanicien juge (en fonction du règlement) si la rame est "apte" à accomplir la mission. De manière générale, l'agent de conduite peut être confronté aux trois situations suivantes : **La rame est en mode de fonctionnement nominal**, c'est à dire qu'aucun défaut n'a été détecté et donc la mission peut être accomplie normalement. **Un ou plusieurs défauts ont été identifiés,** le mécanicien doit vérifier s'il doit respecter des restrictions en fonction de la nature des défauts constatés. Il devra par exemple limiter la vitesse de la rame à 220 km/h si un certain nombre de blocs moteurs sont isolés en freinage électrique. Enfin, la dernière situation pouvant se présenter est celle où **la rame est jugée non conforme pour accomplir la mission,** elle sera donc immobilisée en gare.

B. La conduite

Elle est constituée de différentes tâches que l'on peut regrouper en trois catégories : la tâche de régulation de la vitesse, la tâche de gestion des procédures annexes et la tâche de gestion des dysfonctionnements incluse dans la tâche de régulation de la vitesse.

La tâche de régulation de la vitesse est de type continue, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de situation (sauf à l'arrêt) durant laquelle le mécanicien est dispensé de l'exécution de cette tâche. Parallèlement à la tâche de régulation de la vitesse, deux autres tâches sont réalisées : la tâche de veille automatique et de contrôle du maintien d'appui et la tâche d'acquittement des signaux restrictifs (feux, limitations de vitesse,...). Nous n'entrerons pas dans le détail de ces tâches, nous dirons simplement que la première consiste à contrôler la "présence active" de l'agent de conduite (l'ADC) en cabine par l'intermédiaire d'une commande appelée VACMA, et la seconde a pour objectif de contrôler si le signal restrictif présenté a été bien perçu par l'ADC. La réalisation de la tâche de régulation de la vitesse quant à elle consiste essentiellement à adopter ou à maintenir une vitesse donnée en fonction d'un certain nombre de paramètres. Ces paramètres sont très divers, conflictuels voire contradictoires. Parmi les paramètres les plus

caractéristiques, on trouve : la signalisation de voie (Tableau indicateur de vitesse (TIV), feu,..), la signalisation en cabine (KVB, Cab-Signal,..), les informations comprises dans les documents tels que le FLASH pris au départ, la fiche train, les Fiches Ligne Hebdomadaire (FLH),..., les restrictions dues aux défauts des équipements, de l'écart par rapport à l'horaire (retard du train) et bien entendu de la vitesse réelle du train. Pour généraliser cette tâche de régulation de la vitesse et faire abstraction des supports matériels utilisés pour transmettre ces informations à l'agent de conduite, on peut avancer que les informations **utilisées et utiles** sont :

1. la vitesse réelle du train à l'instant t,
2. la vitesse à respecter à l'instant t,
3. la vitesse à respecter à l'instant t_1, appelée vitesse but,
4. la distance entre la position du train à l'instant t et la position du train à l'instant t_1, appelée distance but,
5. les valeurs des consignes effectives de traction et de freinage demandées par l'agent de conduite à la machine, par exemple, pour réduire la vitesse de 220 km/h à 120 km/h, l'ADC fera une dépression dans la conduite générale de X bars, cette consigne de freinage correspondra à 10%, 20% ou N% des performances de freinage de la rame en fonction de l'état des équipements (bloc moteur isolé,...) et de l'état de la voie (adhérence, patinage).

On peut donc considérer que l'agent de conduite doit réaliser de manière continue la tâche relative à la **gestion des dysfonctionnements**.

La tâche de gestion des procédures annexes est de type ponctuel, ou autrement dit les procédures annexes seront exécutées à des instants donnés. Ces procédures peuvent être regroupées en deux catégories. Les premières sont celles liées à la gestion des communications radio (appel et réception), elles se caractérisent par leur aspect aléatoire. Les autres consistent essentiellement à adapter la rame aux caractéristiques des équipements électriques de voie (tensions caténaires), ce sont par exemple les procédures de changement de pantographes et de changement de puissance.

C. Le rangement de la rame à l'arrivée

Elle consiste à ranger la rame en gare ou en dépôt et à annoter un certain nombre de documents, notamment sur la configuration des équipements de la rame, des incidents survenus lors de la mission et des horaires (retard, rattrapage de retard,...)

Ainsi, la tâche de régulation de la vitesse constitue la tâche principale de conduite des trains. C'est donc principalement la tâche de régulation qui sera étudiée par la suite, tout en gardant à l'esprit qu'elle n'est pas l'unique tâche à effectuer par les conducteurs.

2.3.4 La régulation de la vitesse

L'analyse de l'activité de conduite des mécaniciens a permis de mettre en évidence la place centrale qu'occupe la tâche de régulation de la vitesse dans la tâche globale. En effet, la tâche de régulation de la vitesse est considérée comme essentielle tant du point de vue de l'exploitation (réussite d'une mission en un temps donné avec respect des consignes de sécurité) que du point de vue du mécanicien (intérêt du travail). Ses caractéristiques sont :

? qu'elle présente un caractère dynamique : se déplacer dans un espace défini, d'un point A à un point B, limité à des vitesses variables en fonction d'une diversité de critères possibles : horaires, signalisation, confort passager, économie d'énergie, sécurité,...

? qu'elle est décomposable en une multitude de sous tâches : procédures de démarrage, mise en service, surveillance des appareils de bord, observation des signaux, acquittement des signaux,...elles-mêmes décomposables en actions élémentaires de type cognitives ou motrices dans des proportions diverses (BENCHEKROUN, 1991). Ces sous-tâches peuvent entrer en conflit entre elles ou avec les autres tâches de la conduite : gérer les alarmes, les incidents, les appels radio, actionner la vacma, gérer les changements de courant,...

LAMONDE (1994) confirme ces constats lors d'une étude menée sur les conducteurs de trains canadiens : « La conduite de train n'est pas une action prédéterminée, mais constituée d'une suite de déterminations de « quoi faire » et de « comment le faire », en temps réel, en tenant compte du contexte. Si elle n'est pas prédéterminée, l'activité n'est pas pour autant aléatoire : grâce aux éléments de stabilité inter trajets, les conducteurs organisent la prise en compte du contexte à venir, de façon à rendre l'activité plus sensible aux circonstances singulières et évolutives du trajet. »

L'anticipation a donc un rôle primordial dans l'activité de régulation de la vitesse, notamment par la prise en compte de paramètres directement liés à la connaissance de ligne et par la connaissance de la vitesse qu'il faudra avoir par la suite. La connaissance de ligne constitue en effet un élément d'information essentiel au conducteur. Ceci a été mis en évidence

lorsque l'on a demandé aux conducteurs de faire une représentation graphique du parcours qu'ils avaient effectué (Figure 12). On a ainsi montré une parfaite connaissance du déroulement de la ligne, d'autant plus claire et simplifiée que l'expertise du conducteur est forte.

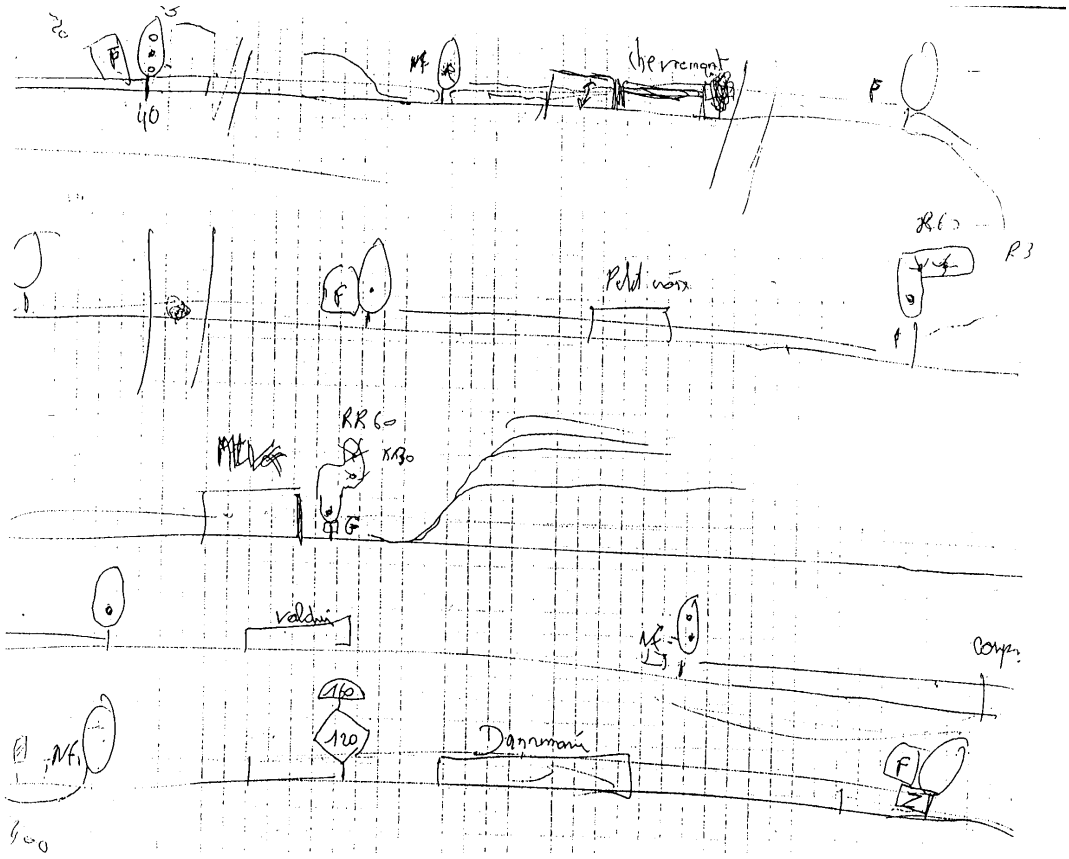


Figure 12 : Exemple de représentation d'un trajet sur ligne classique.

En fait, la connaissance de ligne permet de mieux gérer la multitude de critères (objectifs prescrits ou contraintes existantes), représentés Figure 13, qui doivent être pris en compte pour l'anticipation lors de la régulation de la vitesse.

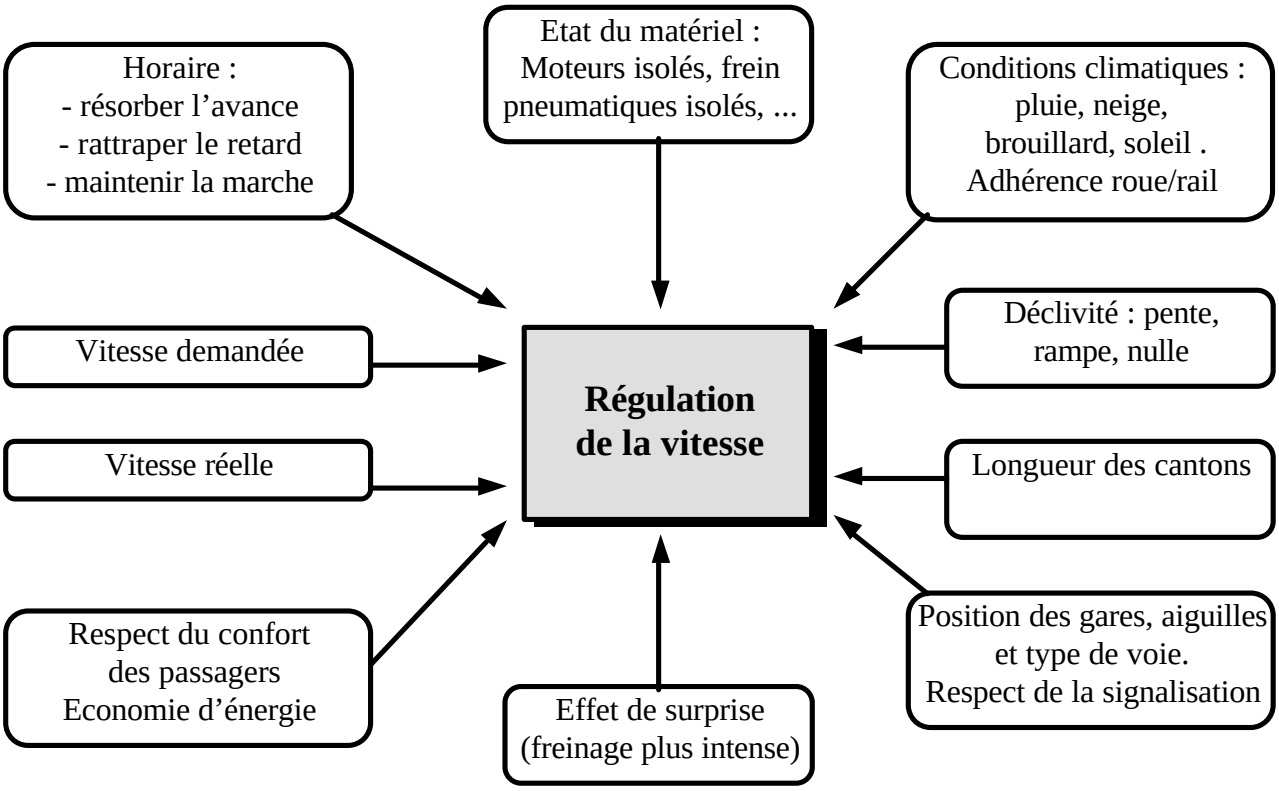
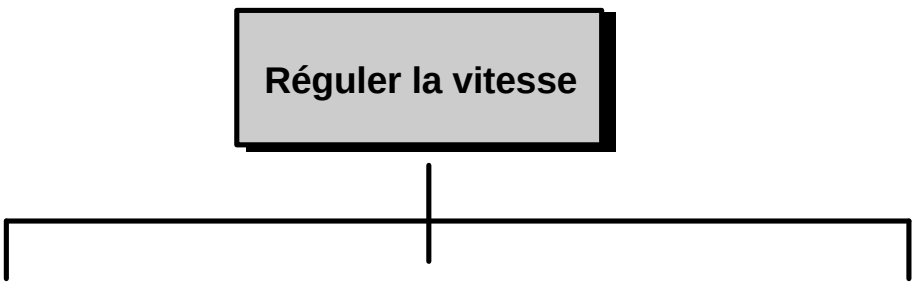


Figure 13 : Objectifs prescrits ou contraintes existantes influençant la régulation de la vitesse.

On comprend ici la nécessité d'aides à la conduite permettant de mettre en évidence, selon les situations vécues, les éléments informationnels permettant de mieux anticiper les actions de régulation en fonction des situations rencontrées. Ainsi, c'est lors des différentes observations et des questionnaires que l'on peut hiérarchiser l'ensemble de ces informations en vue d'une reconception des interfaces liées à la régulation de la vitesse.

Les objectifs effectifs de la régulation de la vitesse, qui ont été déterminés au cours de verbalisations avec les mécaniciens et lors des observations, sont résumés Figure 14. Ils permettent d'ores et déjà de lister un ensemble de critères liés au cahier des charges de la commande de régulation de la vitesse.



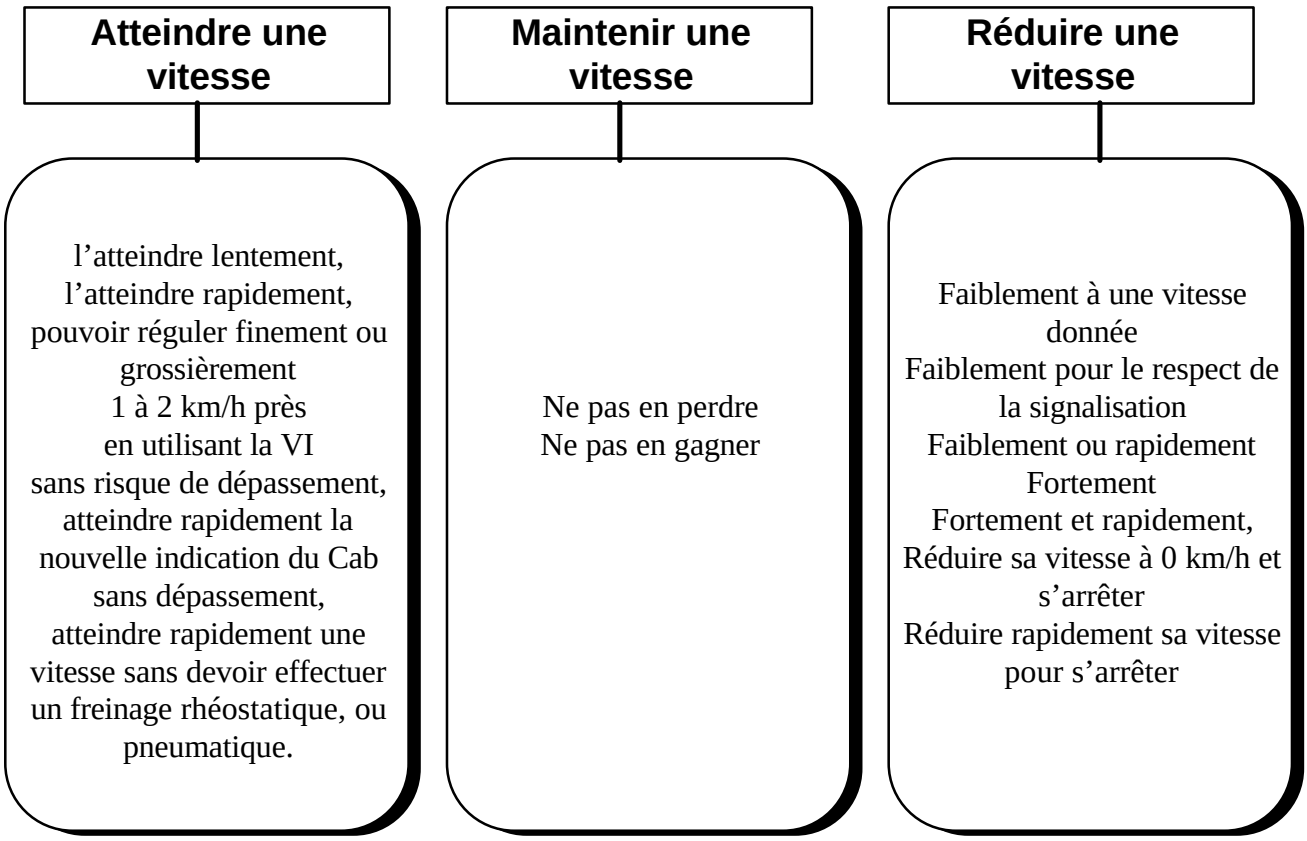

Atteindre une vitesse
Maintenir une vitesse
Réduire une vitesse
l'atteindre lentement,
l'atteindre rapidement,
pouvoir réguler finement ou grossièrement
1 à 2 km/h près
en utilisant la VI
sans risque de dépassement,
atteindre rapidement la nouvelle indication du Cab
sans dépassement,
atteindre rapidement une vitesse sans devoir effectuer un freinage rhéostatique, ou pneumatique.
Ne pas en perdre
Ne pas en gagner
Faiblement à une vitesse donnée
Faiblement pour le respect de la signalisation
Faiblement ou rapidement
Fortement
Fortement et rapidement,
Réduire sa vitesse à 0 km/h et s'arrêter
Réduire rapidement sa vitesse pour s'arrêter

Figure 14 : Objectifs effectifs de la régulation de la vitesse.

Il s'agit donc d'intégrer l'ensemble de ces résultats issus de l'analyse de la tâche et de l'activité en vue de la conception du futur poste de conduite, et d'alléger les connaissances à maîtriser par le conducteur en lui apportant une aide informationnelle par rapport aux situations rencontrées. L'importance de l'activité liée à la régulation de la vitesse, a ainsi conduit le groupe projet à délimiter l'étude à l'ensemble des dispositifs liés à la régulation de la vitesse : les dispositifs physiques de **commande de traction freinage** et de **vitesse imposée (VI)**, les **interfaces visuelles,** ainsi que les **alarmes sonores liées à la vitesse**. Ces divers éléments dont nous allons donner une brève description par la suite, ont donc été retenus parmi les éléments à remettre en question de manière prioritaire dans le cadre de la définition de la cabine des TGV futurs.

2.3.5 Descriptif des éléments en cabine directement liés à l'activité de régulation de la vitesse

Sur le poste de conduite présenté Figure 15, nous avons indiqué les emplacements des principaux dispositifs liés à la tâche de régulation de la vitesse.

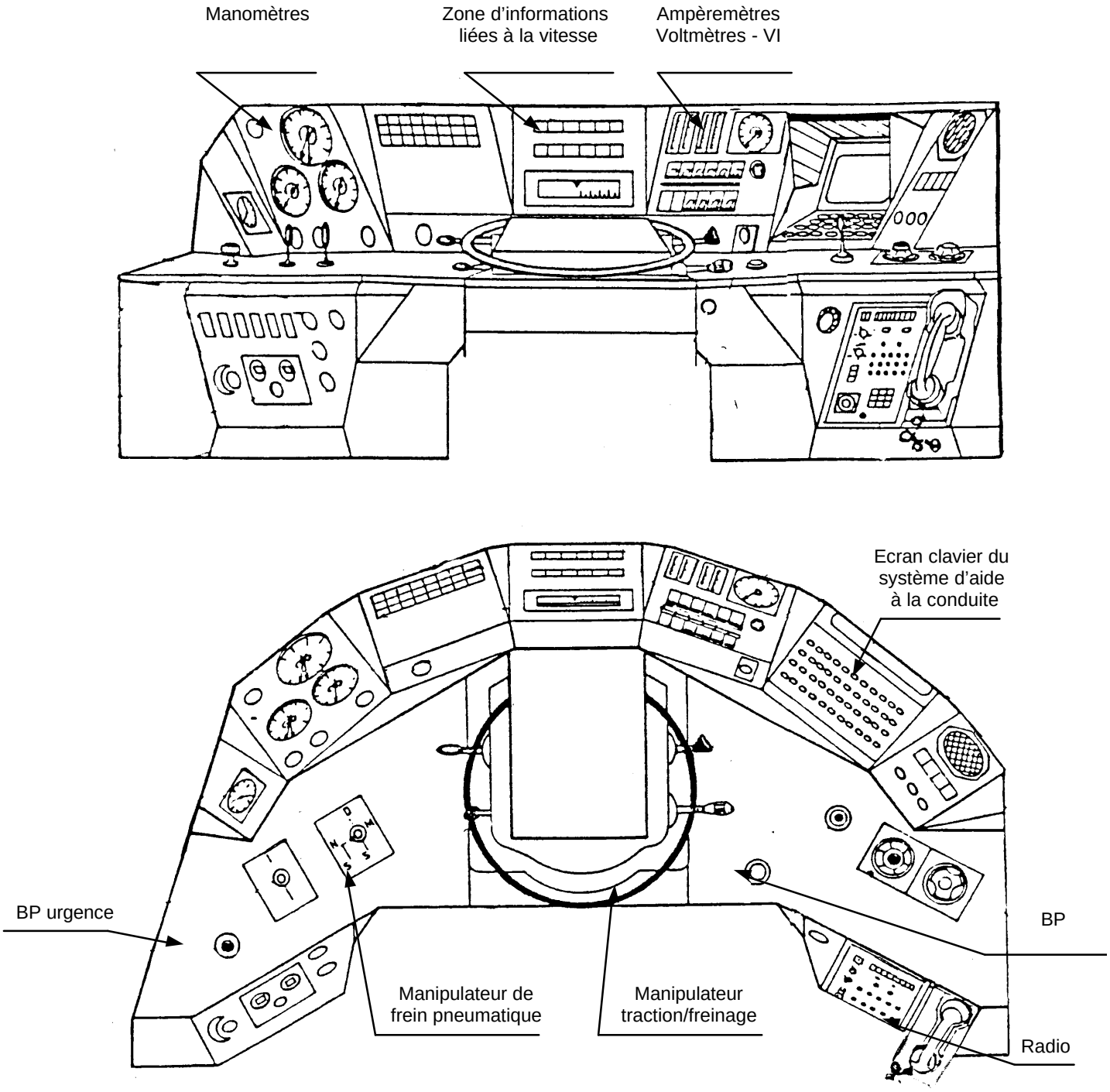


Figure 15 : Schémas du poste de conduite et des différents éléments qui le composent.

A. Le manipulateur de traction freinage électrique et les commandes de freinage électropneumatique.

Le manipulateur de traction freinage électrique

La Figure 16 ci-dessous représente le manipulateur de traction freinage électrique actuel, qui regroupe les différentes fonctionnalités liées à la traction et au freinage électrique ainsi que le dispositif de réglage de la vitesse imposée.

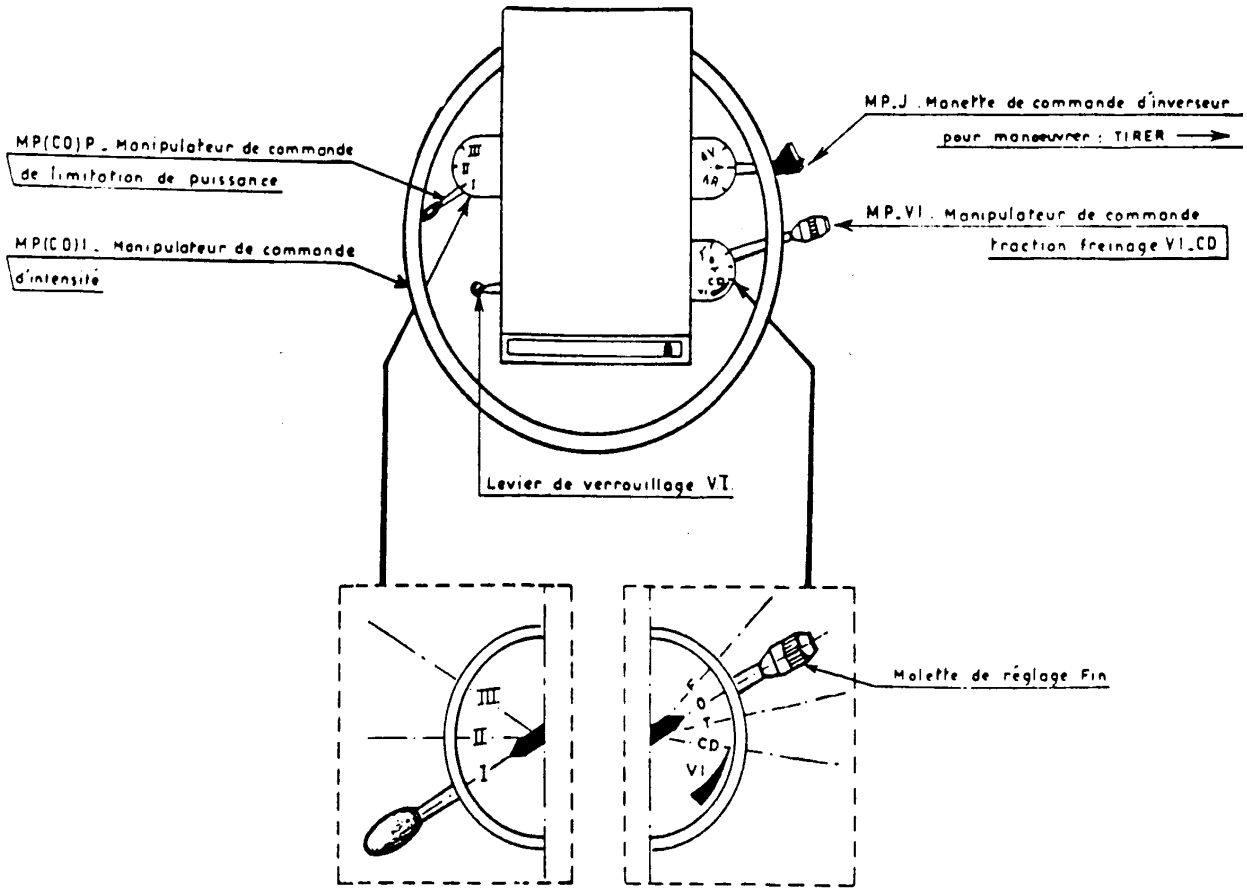


Figure 16 : Descriptif des éléments du manipulateur de traction freinage électrique.

On comprend bien ici toute la complexité de cette commande qui regroupe des fonctions liées directement à la traction et au freinage électrique, mais également des fonctions annexes telles que la limitation de puissance en fonction du type de ligne, ou l'inverseur du sens de marche utilisé à de rares occasions lors de manoeuvres.

Le manipulateur de freinage électropneumatique :

Cette commande est un manipulateur situé à gauche du pupitre de conduite. On peut l'actionner à tout instant en tirant la commande vers soi (serrage proportionnel au temps de manipulation) ou en poussant devant soi (desserrage proportionnel au temps de manipulation).

Le freinage d'urgence :

Cette commande est manoeuvrable par l'action du conducteur sur l'un des deux boutons-poussoirs rouges de type coup de poing « BP URG ». Cette manoeuvre provoque l'arrêt du train le plus rapidement possible dans les situations d'urgence (obstacle voie,...). Mais sa manipulation peut ne pas suffire si le TGV est lancé à grande vitesse, dans la mesure où il mettra plus de 2 km avant de s'immobiliser.

B. Les interfaces visuelles liées à l'activité de régulation de la vitesse.

✍ Le tachymètre :

Il fournit au conducteur la vitesse de l'engin et permet un enregistrement sur bande graphique pour un contrôle a posteriori du trajet, qui peut être effectué par le chef de traction de l'établissement d'origine du conducteur.

✍ Les manomètres :

Le manomètre de conduite générale (CG) est utilisé pour des diagnostics et essais des freins, et par certains conducteurs comme élément de contrôle lors du freinage.

Le manomètre RE est indispensable pour effectuer le freinage pneumatique puisqu'il fournit l'indication de quantité de freinage. Son utilisation reste ponctuelle.

✍ Les ampèremètres :

Ils fournissent une indication sur l'intensité consommée par les blocs moteurs de la motrice. Ils sont utilisés ponctuellement pour le diagnostic (patinage, enrayage) et par certains conducteurs qui régulent leur niveau de traction à l'aide de l'ampèremètre.

✍ Les voltmètres en ligne :

Ils fournissent comme indication la tension disponible à la caténaire. Ces informations sont indispensables pour détecter les seuils de tension (en continu), afin de détecter les anomalies, la vitesse de variation et la quantité précise de tension permettant d'adapter sa régulation de vitesse.

✍ La signalisation :

La signalisation vise à assurer la sécurité des trains en évitant que ceux-ci puissent se rattraper ou circuler en sens inverse sur une même voie, pour éviter les déraillements liés à un excès de vitesse, pour protéger la circulation dans les gares, pour les franchissements de passages à niveau, pour la sécurité lors de travaux sur la voie,...

Toutes les lignes ne sont pas équipées de la même manière en terme de signalisation :

* les lignes classiques, limitées à 160 km/h sont équipées de signaux extérieurs latéraux.

* Les lignes Grande Vitesse (LGV) sont équipées d'une **signalisation en cabine**, qui permet d'indiquer sous forme d'afficheur lumineux, accompagné d'un signal sonore, les ordres nécessaires à la conduite du train.

✍ La fiche train et autres documents :

Lors de la prise de service, le conducteur consulte :

* la fiche train, qui indique le trajet à effectuer, les gares à desservir, les horaires, (arrivée et départ des gares), les vitesses maximales à ne pas dépasser sur chaque tronçon de voie, les vitesses minimales permettant de respecter l'horaire, le PK (point kilométrique), les minutes pouvant être rattrapées en cas de retard,
* les avis de travaux effectués sur la voie,
* les PGM (Prescriptions Générales du Mécanicien), qui sont les réglementations à suivre en cas de problème.

C. Les alarmes sonores liées à l'activité de régulation de la vitesse.

Les alarmes sonores présentes en cabine se sont multipliées au rythme de l'intégration de nouveaux dispositifs en cabine. On en dénombre aujourd'hui 23, ce qui est beaucoup en terme de mémorisation pour le conducteur. Six d'entre elles concernent directement l'activité de régulation de la vitesse :

✍ l'alerte dépassement vitesse KVB, qui signale un dépassement de la vitesse autorisée de plus 5Km/h,

✍ le signal fermé en répétition des signaux optiques, qui averti le conducteur de la rencontre d'un signal restrictif concernant la vitesse en ligne classique,

✍ le bip d'attention TVM avec KVB ou appel d'attention de la répétition des signaux, qui informe du changement des indications de vitesse en cabine,

✍ l'effacement du « b » KVB, qui limite le conducteur à 160 km/h au lieu des 220 km/h autorisés sur certaines lignes,

✍ l'alarme voyageur, qui est déclenchée suite à la mise en action d'un arrêt d'urgence par un voyageur. Elle implique un arrêt d'urgence en gare et une séquence de ralentissement du train en campagne,

✍ l'alerte radio, dont la réception entraîne un arrêt d'urgence immédiat. L'envoi de l'alerte radio s'effectue lorsque l'on considère qu'il y a danger pour les autres trains. Elle implique l'arrêt immédiat des trains dans un rayon géographique donné.

D. La commande VACMA.

Le conducteur doit actionner régulièrement une commande appelée VACMA, afin de témoigner de son état d'éveil en cabine. Il dispose à cet effet d'une zone sensitive sur la partie circulaire du manipulateur (le cerclo) ainsi que de deux pédales sous le pupitre. Cette commande est appelée « homme-mort ». Si elle n'est pas actionnée après 5 secondes de relâchement, un son se déclenche et le conducteur dispose de 2.5 secondes pour l'activer avant qu'une prise en charge ne soit effectuée par la machine (freinage d'urgence automatique). De la même manière, la VACMA ne doit pas être activée en continu plus de 60 secondes. Il est nécessaire de prendre en compte cette commande, dans la mesure où sa manipulation par le conducteur intervient de manière continue, tout au long des parcours effectués.

2.3.6 Principaux éléments issus de l'analyse tâche/activité des conducteurs TGV.

L'approche globale au niveau de l'analyse de la tâche et de l'activité est ici apparue essentielle. Les verbalisations, les données objectives mesurées lors des trajets ainsi que les avis des ergonomes formulés sur la base des connaissances théoriques de l'ergonomie (GAVOILLE et coll., 1992; BOLLON et coll., 1992), ont permis de porter un diagnostic sur les situations de travail des conducteurs, ainsi que sur les différents éléments décrits ci-dessus, qui permettent de réaliser la tâche actuelle de régulation de la vitesse. Afin de mieux comprendre ce qui nous a guidés par la suite dans nos choix de conception, nous avons dressé une synthèse par dispositif des principaux résultats de cette étape d'analyse/tâche activité.

A. Principaux éléments issus de l'analyse tâche/activité concernant le manipulateur traction/freinage

- ✍ Le manipulateur de traction freinage actuel ne permet pas aisément d'obtenir toutes les configurations de régulation de vitesse souhaitées (réguler rapidement, fortement,...) et nécessite un nombre d'actions trop important.
- ✍ Il peut être potentiellement générateur d'erreurs humaines liées au dépassement de la vitesse.
- ✍ Il ne dispose d'aucune sécurité permettant d'éviter un déplacement involontaire.
- ✍ Le frein électropneumatique est pratiquement toujours utilisé lors d'arrêts en gare ou lors de l'apparition de signaux fermés et de changements de ligne, on ne peut établir une règle générale quant à l'utilisation du freinage électrique. En effet, son utilisation reste très

variable en fonction des situations rencontrées (type de ligne, déclivité, utilisation de la VI, conducteur).

B. Principaux éléments issus de l'analyse tâche/activité concernant le dispositif de vitesse imposée (VI)

✍le dispositif de VI ne répond que partiellement aux objectifs des mécaniciens :

* l'atteinte de la vitesse imposée et son non dépassement dépendent du manipulateur de traction freinage électrique (MP-CO-I),
* l'utilisation de la VI ne permet pas une conduite économique,
* le nombre d'actions nécessaire à l'utilisation de la VI étant trop élevé, le dispositif de VI n'est pas toujours utilisé,
* les conducteurs sont amenés à faire face à de nombreuses imperfections du système en termes de facilité de réglage et de fiabilité d'étalonnage par rapport au tachymètre. Même s'ils trouvent des solutions concernant les dysfonctionnements, cela implique une charge de travail supplémentaire et une bonne connaissance de ligne,
* le système de réglage de la VI n'est pas assez précis par rapport aux besoins des ADC et présente des risques dus à la focalisation de l'attention des conducteurs lors de son réglage. De plus, la VI peut être déréglée involontairement.

✍La VI permet cependant de limiter le nombre des zones informationnelles à observer et à traiter (moins de consultations du tachymètre), de diminuer la charge cognitive et de se concentrer momentanément sur d'autres informations pertinentes.

✍Il doit y avoir les deux modes de conduite possibles, avec ou sans la VI, dans la mesure où son utilisation dépend essentiellement du profil de la ligne.

C. Principaux éléments issus de l'analyse tâche/activité concernant l'interface visuelle liée à la régulation de la vitesse

✍ « On régule sa vitesse par rapport au tachymètre et non par rapport au défilement du paysage ». Ceci constitue le point de départ du raisonnement du conducteur.

✍ La consultation du tachymètre est parfois inconsciente (arrêt en gare). Le comportement observé relève alors d'un automatisme sans qu'il y ait un contrôle conscient du conducteur.

✍ On constate que l'attention des conducteurs est focalisée sur le champ visuel correspondant à l'environnement extérieur qu'il observe en priorité. Cette observation est interrompue ponctuellement par des prélèvements d'informations en cabine. L'occurrence d'apparition de

ce type de direction de regard est très élevée, car la connaissance de la vitesse réelle ou imposée est une source essentielle d'information pour la conduite.

✍ Les regards vers l'intérieur droit et gauche concernent la consultation des ampèremètres et des voltmètres. Ceux-ci permettent d'anticiper l'évolution de la vitesse en tenant compte de la déclivité de la voie. Le conducteur dispose donc d'un modèle mental lui permettant de gérer sa vitesse en fonction du niveau relevé sur les ampèremètres.

✍ Les autres regards concernent la consultation de la feuille de route, en particulier lors de la présence de travaux sur la voie. Cette consultation est essentielle lors d'une mauvaise connaissance de la ligne, mais bien souvent la connaissance de la ligne qu'ont les conducteurs remplace la consultation de la feuille de route.

✍ Les principaux problèmes rencontrés au niveau des interfaces visuelles sont :

* l'existence de modes de présentation variés (symbolique, digital, analogique,...) et de localisations différentes d'informations de même nature ou traitées simultanément,
* l'implantation additive et anarchique de nouveaux appareillages (c'est le cas du TGV PBKA),
* la non satisfaction de la totalité des besoins informationnels réels (la localisation précise des défauts des bogies moteurs par exemple n'est pas indiquée par l'icône de défaut),
* une présentation de l'information inadaptée : Une même source d'information peut apporter différents éléments de réponse au conducteur. En effet, elle peut être interprétée de manière différente suivant la situation actuelle et future, et selon les objectifs du conducteur.

D. Principaux éléments issus de l'analyse tâche/activité concernant l'interface sonore liée à la régulation de la vitesse

✍Les fréquences et niveaux sonores sont inadaptés au bruit de fond de la cabine (bruit moteur, bruit de roulement, bruit aérodynamique), qui est très varié selon les vitesses (de 0 à plus de 80 dB).

✍Une même alarme peut impliquer deux types d'actions différentes, c'est le cas de l'alarme voyageur.

✍Une même action peut être provoquée par différentes alarmes, c'est le cas des alarmes impliquant un arrêt d'urgence.

✍Le nombre de 23 alarmes recensées en cabine est trop important.

✍Il n'existe pas de hiérarchisation des alarmes permettant d'établir des priorités lors d'un déclenchement multiple des alarmes.

E. Conclusion sur l'analyse tâche activité des conducteurs

Nous avons donc pu acquérir une bonne connaissance du métier de conducteur TGV, sur la base de l'analyse fine de l'activité de conduite menée sur des TGV existants et du recueil d'un grand nombre de données précieuses relatives à la conduite : nombre de manipulations sur les commandes, temps de manipulation, stratégies de conduite,....Ces analyses ont montré toute l'importance de la régulation de la vitesse et plus particulièrement des dispositifs qui permettent de la réaliser (BOLLON et coll., 1992). L'analyse tâche/activité a donc permis de mettre en évidence les caractéristiques de l'activité de conduite actuelle et nous avons pu obtenir la mesure de certains écarts entre le travail prescrit (la tâche) et le travail réel (l'activité). Ceci a amené le groupe projet à lister l'ensemble des besoins lié à la conduite actuelle. Le recoupement des différentes méthodes utilisées a permis non seulement d'obtenir un maximum d'informations concernant les besoins liés à la conduite TGV, mais également de hiérarchiser l'ensemble des problèmes et informations manquantes sur le poste de conduite actuel. Sans les différents points de vue exprimés au cours de cette analyse, de nombreuses informations auraient été manquantes et un certain nombre de dysfonctionnements n'auraient pas été mis en évidence et pris en compte dans le cadre de la reconception du poste futur.

Soulignons également que le métier de conducteur doit être considéré dans sa globalité et non seulement lors de l'exécution des trajets (DE LA CRUZ et ROCHE, 1990). Les conducteurs, les « roulants », sont amenés à endosser de fortes responsabilités, seuls, aux commandes d'une machine qui évolue fréquemment en fonction des avancées technologiques. Cette solitude est également présente lors des soirées passées à l'extérieur, ce qui pose de nombreux problèmes liés à la vie de famille. De fortes contraintes psychologiques liées aux déplacements viennent ainsi s'ajouter aux difficultés de l'activité de conduite et celles-ci ne peuvent être négligées.

2.4 Spécification des besoins liés à la conduite future

Les discussions avec les membres du groupe projet, ont permis de relever un grand nombre d'informations concernant les évolutions futures du métier de conducteur, les attentes actuelles

des conducteurs, les dispositifs en cours de développement,.... Ainsi, le groupe projet a pu progressivement, à l'appui de ces données, se construire une représentation commune du rôle qu'auront les futurs conducteurs et en déduire ce que nous avons appelé **le champ des activités futures souhaitables des conducteurs**, souhaitables en termes de sécurité, de confort et d'efficacité (SAGOT et coll., 1997). La conception du poste de conduite TGV, comme la conception de toute situation de travail, est en effet dépendante de l'identification et du respect de plusieurs objectifs, visant principalement à optimiser la sécurité, la fiabilité, la performance et le confort du système homme-machine. Cela ne peut se faire qu'en prenant en compte à la fois les caractéristiques et les capacités spécifiques et complémentaires de l'homme et du système.

Sur la base de la définition du champ des activités futures souhaitables des conducteurs, définie ci-après, nous avons pu mettre en forme le cahier des charges fonctionnel et ergonomique lié aux dispositifs futurs. Les principaux types de solutions proposées par rapport à l'évolution de cette activité future souhaitable sont:

- Une modification de l'outil principal de régulation de la vitesse que constitue le manipulateur de traction freinage et du dispositif de vitesse imposée.
- Des propositions de nouveaux moyens matériels (dispositif de régulation de vitesse assisté).
- Des spécifications concernant la conception de la future interface de régulation de la vitesse (besoins et modes de présentation des informations, critères à intégrer...).
- Des développements sur l'apport d'une aide à l'activité de conduite en termes :
  * de suppléance (allocation de certaines sous-tâches au système),
  * d'assistance informationnelle (guide de dépannage informatisé, aide à la gestion de la connaissance de ligne),
  * de filtrage informationnel pour certains éléments perturbateurs.

2.4.1 Définition du «champ des activités futures souhaitables»

Nous avons été amenés à identifier les contraintes futures et leurs conséquences sur l'activité (Tableau 1), en vue de mieux définir le champ des activités futures souhaitables. Ceci a été rendu possible par l'examen :

- des facteurs déterminants de l'activité actuelle, susceptibles d'être présents (variabilité des outils, des lignes, des besoins informationnels et des dysfonctionnements), des objectifs et stratégies mises en place par l'opérateur,
- de la prise en compte des carences existantes non couvertes par le système actuel (besoin informationnel insatisfait, inadaptabilité de certains outils) et des dysfonctionnements rencontrés,
- de moyens futurs disponibles en terme de communication train environnement extérieur (localisation du train par satellite, amélioration des transmissions radio,...),
- de la spécification SNCF de la philosophie de conduite future (rôle de l'homme dans le système, notion de pause,...),
- des évolutions du contexte socio-économique et technologique (interpénétration sur d'autres réseaux, accroissement des vitesses des trains, du débit des rames, systèmes de communication sol/train,...), entraînant une modification de l'activité de conduite.

Lors de cette phase, le groupe projet tente de définir des objectifs précis et cohérents concernant les outils et moyens matériels et immatériels (interfaces et aides au travail) à mettre en place. En effet, comme le souligne MILLOT (1988) : La machine est capable de mesures et d'actions très précises sur l'environnement ainsi que de stockages et de traitements rapides d'un grand nombre d'informations, mais elle peut être impuissante pour élaborer une stratégie. L'homme est capable quant à lui, appuyé par son expérience, « d'analyser la situation par une extraction et une hiérarchisation subjective des informations qui lui facilitent des prises de décision rapides mais des performances variables ».

Contraintes futures et conséquences sur l'activité	Contraintes commerciales et conséquences conceptuelles
Diversification des types de TGV ✍ diversité des matériels à maîtriser Evolution des technologies utilisées ✍ augmentation du nombre de restrictions Augmentation de la longueur des trajets ✍ planification du travail Augmentations de la vitesse et de la densité du trafic ✍ augmentation de la densité des tâches à effectuer Augmentation du volume de connaissances de ligne ✍ risque de diminution de l'expertise par rapport à chaque ligne Interpénétration des réseaux européens (passages de frontières) ✍ adaptation à chaque type de signalisation	Demandes spécifiques en termes d'équipements (tachymètre, écran, ..) pour chaque pays Demandes spécifiques en termes d'interfaces (type graphique, type classique,...) Demandes spécifiques en termes de langues utilisées dans les interfaces (français, anglais, allemand,....) Demandes de modifications par le client de certains affichages voire de certains principes fonctionnels de la rame ✍ pour un même type d'engin, des coûts de recherche et de développement accrus ✍ pour un même type d'engin, des coûts de tests et de validations accrus ✍ pour un même type d'engin, des coûts de modifications accrus Transfert de solutions et d'équipements d'un type de train à un autre (exemple : transfert des résultats du TGV vers d'autres matériels, type locomotive) ✍ prise en compte de cet objectif dès la conception

Tableau 1 : Contraintes futures à prendre en compte dans la définition du champ des activités futures souhaitables.

Le Tableau 1 ci-dessus donne un aperçu des contraintes qui vont faire évoluer le métier de conducteur. Une nouvelle philosophie de conduite a donc du être définie en prenant en considération les évolutions envisageables d'un point de vue technique et commercial. L'implication des concepteurs est essentielle à ce niveau de l'étude dans la mesure où ils occupent une place privilégiée concernant la définition des futurs moyens d'exploitation. Ainsi, lors de la définition du champ des activités futures souhaitables, c'est l'ensemble des intervenants au sein du groupe projet qui a été amené à réfléchir sur : la place assignée à l'homme dans le futur système Homme-Machine - la répartition des tâches Homme-Machine - les éléments d'assistance informationnelle nécessaires à la conduite future et - les modifications à apporter aux dispositifs.

A. Place actuelle de l'homme dans la boucle de régulation

Définir une aide à l'activité de conduite, c'est avant tout prendre en compte la place qu'occupe l'homme dans la boucle de régulation du système et voir comment dans l'avenir cette place va évoluer, sachant que ce déplacement n'est pas uniquement lié à l'automatisation mais également à la nature des tâches futures qu'il aura à effectuer (contrôle, exécution...). La Figure 17, ci-dessous représente schématiquement un modèle de la conduite actuelle.

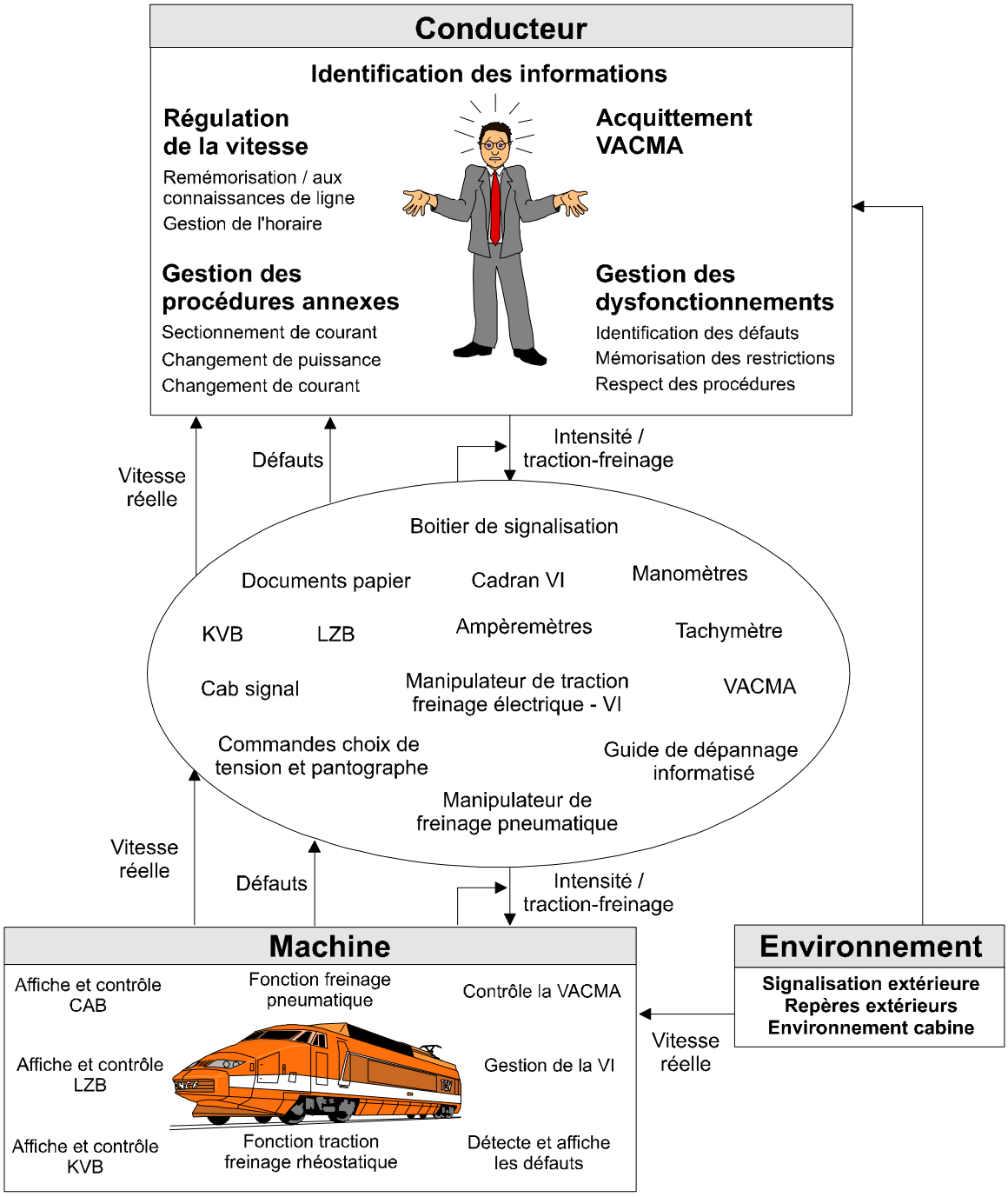


Figure 17 : Schéma de la fonction de régulation de vitesse dans le système actuel.

Chaque élément du système (conducteur, machine, environnement), est ici représenté avec les fonctions ou éléments principaux qui le composent. Les flux d'informations liées à la régulation de la vitesse ont été mis en évidence entre ces différents environnements. Ainsi, le conducteur, prélève l'information donnée par l'environnement, soit directement lors d'un contrôle visuel, soit par l'intermédiaire de sa machine qui transmet l'information à l'aide de différentes interfaces. Les interfaces qui sont représentées au centre de la Figure 17 s'avèrent être très nombreuses, peu structurées et le conducteur se trouve fréquemment sollicité lors du déroulement de son activité, par de nombreuses sources d'informations. On peut donc d'ores et déjà constater une surcharge réelle en termes d'informations disponibles, et un problème lié à l'organisation de ces informations. Des recherches plus fines ont donc été effectuées concernant la répartition des tâches homme / machine et l'assistance informationnelle.

B. La répartition des tâches homme / machine

Il s'agissait ici d'évaluer les différentes capacités de la machine du point de vue de l'apport d'une aide à l'activité du mécanicien. Le groupe projet a ainsi dressé un état des différents types et formes possibles d'aides à la conduite en termes d'automatismes, d'assistance informationnelle, de filtres,..., en mettant l'accent sur leurs limites et conséquences.

L'allocation d'une partie des tâches à la machine permet une réduction de la charge de travail et donc une disponibilité accrue du mécanicien pour gérer d'autres sous-tâches voire se consacrer plus pleinement à une tâche noble. On peut ainsi définir deux stratégies d'automatisation, caractérisant deux modalités de coopération homme machine possibles (MILLOT, 1988).

1. La "**substitution**" ou encore la répartition statique des tâches, qui consiste à allouer certaines tâches ou procédures au système et ceci de façon fixe, avec toutefois des possibilités de reprise manuelle en cas de défaillance technique. Les problèmes principaux actuellement relevés sont d'une part l'automatisation à outrance (le maximum de tâches possibles) et d'autre part le déplacement de l'homme dans la boucle de régulation du système (en tant que simple superviseur). Cependant une allocation correctement pensée peut permettre une assistance à l'opérateur tout en lui confiant la responsabilité de toutes les tâches de décision.

2. La "**collaboration**" ou encore la répartition dynamique des tâches, consiste à moduler l'intervention du système sur la base de la surcharge informationnelle. Cette intervention peut se faire selon deux modes de gestion : implicite (automatiquement géré par le calculateur) ou explicite (la gestion du partage est confiée à l'opérateur).

Cependant, il existe des **limites** à l'utilisation des **automatismes** (REASON, 1993):

? Malgré une possibilité (apparente) de pouvoir décrire entièrement le système, ce qui consisterait à intégrer les capacités de l'opérateur telles que l'anticipation, l'estimation, le jugement (qualitatif), la réaction face à une situation nouvelle..., il est à ce jour absolument impossible d'anticiper toutes les situations et de définir le comportement du système pour chaque situation. I1 faudrait en effet prendre en compte non seulement toutes les situations mais aussi les variétés de combinaisons de ces situations.

? Le rapport coûts/bénéfices de l'automatisation n'est pas systématiquement rentable en terme financier.

? On observe un phénomène caractéristique de déplacement ou de transformation des erreurs humaines en des erreurs de "logiciel", dues essentiellement à un manque d'exhaustivité lors de l'analyse du système, aux erreurs effectuées lors des phases de développement et à la non prise en compte des connaissances et habitudes des opérateurs pour les récupérations d'erreurs.

? Dans les systèmes dynamiques complexes, le fonctionnement en temps réel devient impératif. Or, le nombre de variables à prendre en compte simultanément devenant gigantesque, pour permettre à l'ordinateur d'obtenir les résultats avant la fin du temps disponible, les algorithmes de calcul de types procéduraux sont remplacés par des algorithmes utilisant des heuristiques et donc susceptibles de générer des erreurs semblables aux erreurs humaines.

L'utilisation des **automatismes** comporte des **risques** (AMALBERTI, 1996):

? compatibilité des choix d'ordre "politique" avec les besoins ergonomiques,

? perte de compétence (problèmes en cas de reprise manuelle),

? l'opérateur doit être capable de comprendre et maîtriser le système informatisé (problèmes en cas de défaillance du système),

- ? les systèmes automatisés, conçus selon des principes de répartition dynamique des tâches, peuvent conduire dans les situations dégradées à des actions inadaptées par rapport à la "couche d'automatisme active",
- ? l'opérateur doit vérifier les résultats obtenus par le système et non surveiller la manière dont le système effectue les tâches,
- ? les systèmes automatisés tendent à masquer les défaillances jusqu'aux limites tolérables du processus (les possibilités de récupération par l'opérateur sont réduites). I1 est alors impératif de permettre aux opérateurs de suivre l'évolution du système, en leur donnant ainsi la possibilité d'anticiper les actions de corrections, de même qu'ils doivent avoir la possibilité de constater les résultats de leurs actions.

C. L'assistance informationnelle

L'assistance utile, qui elle est définie à partir de l'analyse cognitive, doit avant tout tendre vers l'accroissement de l'habileté et des connaissances de l'opérateur, plutôt que vers une substitution de la machine. Un système d'assistance doit donc être un instrument qui accroît la capacité de l'opérateur à "voir", comprendre et contrôler le monde concerné. I1 est possible de classer les types d'aides au travail en trois grandes catégories décrites ci-après :

? **Les supports aidant l'opérateur à structurer un champ informationnel donné :**

Ils permettent de fournir les informations utiles sous une forme rapidement détectable et traitable par le sujet humain.

? **Les supports filtrant l'information :**

Ils permettent le masquage de certaines informations aux opérateurs sur la base de la pertinence de l'information. Par filtrage, nous entendons une mise en attente d'une information (et non une suppression de cette information), afin de laisser le temps au conducteur de finir une action engagée.

? **Les supports traitant l'information et conseillant l'opérateur :**

Ces aides permettent l'assistance de l'opérateur dans les multiples fonctions qu'il exerce : détection, interprétation, diagnostic, anticipation, surveillance, dépannage...

D. Place future de l'homme dans la boucle de régulation

Sur la base des différents constats effectués ci-dessus, le groupe projet a pu définir un compromis concernant la définition du champ des activités futures souhaitables des

conducteurs. Celle-ci a été construite et validée par l'ensemble du groupe projet au cours de plusieurs séances de travail, dans la mesure où elle constitue un élément essentiel avant le passage à l'étape proprement dite de conception. La Figure 18 ci-dessous, représente la conduite future telle qu'elle a pu être envisagée par le groupe projet.

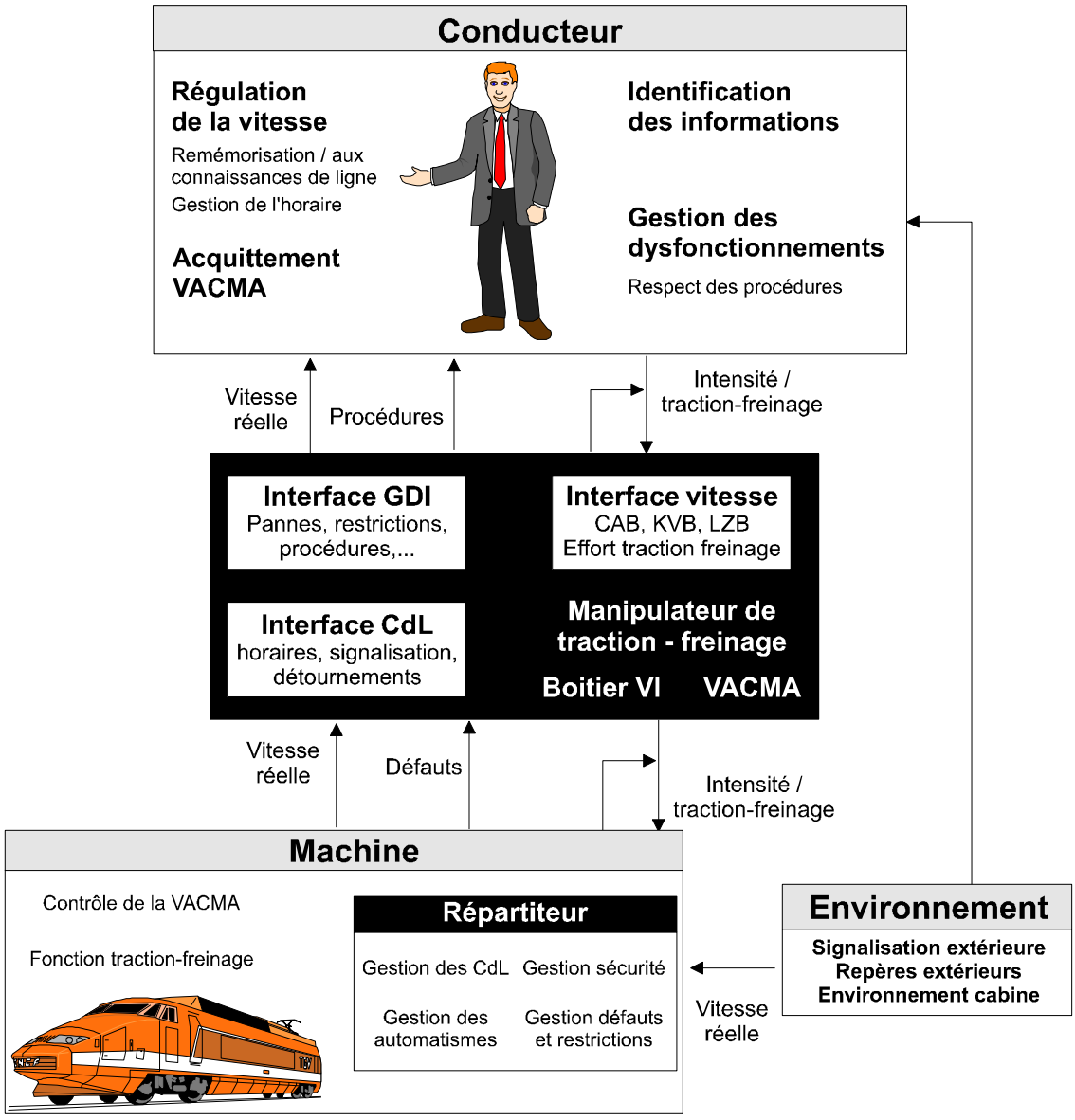


Figure 18 : Schéma de la fonction de régulation de vitesse dans le système futur retenu.

De la même manière que pour la représentation schématique du modèle de la conduite actuelle chaque élément du système (conducteur, machine, environnement), a été représenté avec les nouvelles fonctions ou les nouveaux éléments qui le composent. Les flux d'informations liées à la régulation de la vitesse ont été mis en évidence entre ces différents environnements. Les interfaces qui sont représentées au centre de la Figure 18 ont été

restructurées, compte tenu des évolutions qui concernent la répartition des tâches homme-machine et de l'assistance informationnel.

Rappelons que dans le cadre de la conduite ferroviaire, les objectifs essentiels définis par le groupe projet sont d'une part, de préserver le sentiment d'autonomie et le degré d'initiative du mécanicien et d'autre part, de conserver, voire d'accroître son rôle de décideur et son pouvoir de contrôle sur la conduite (par la possible prise de décision quant à l'exécution de certaines procédures actuellement gérées par le système). Les modifications à apporter au système vont donc permettre de décharger l'opérateur de plusieurs tâches répétitives automatisables que sont par exemple les procédures annexes. Ainsi, le conducteur sera amené à se concentrer essentiellement sur sa tâche principale de régulation de la vitesse. Il sera assisté, s'il le souhaite, par une interface de connaissance de ligne (CdL), qui permettra l'extension de son rayon d'action géographique. Concernant la gestion des dysfonctionnements, il sera assisté, et pourra jouer un rôle quant aux choix à effectuer en fonction de la situation rencontrée.

On voit ici tout l'intérêt de mettre en place un système de répartition des tâches homme-machine plus adapté qui va contribuer à valoriser le travail du conducteur tout en limitant les actions répétitives. L'adaptation des interfaces permettra quant à elle de faciliter la prise d'information du conducteur.

A ce stade de l'étude, le groupe projet s'est recentré sur les dispositifs liés à la régulation de la vitesse, tout en gardant à l'esprit cette vision globale de la conduite future. Les membres du groupe projet ont ainsi commencé à détailler les besoins fonctionnels de manière plus précise, concernant chacun des dispositifs retenus, au sein d'un cahier des charges.

2.4.2 Le cahier des charges fonctionnel des dispositifs

Lors de l'analyse de l'activité puis lors de l'étape de définition du champ des activités futures souhaitables, un certain nombre de dysfonctionnements et d'attentes liés aux dispositifs étudiés ont été listés. Ainsi, le groupe projet a repris et hiérarchisé pour chaque dispositif les critères à respecter dans le futur, en vue d'une analyse plus détaillée.

A titre d'exemple, nous avons fait figurer un extrait du tableau de synthèse des critères futurs à respecter (Tableau 2), qui a constitué le cahier des charges fonctionnel des futurs dispositifs.

Dispositif concerné	Résultat de l'analyse	Critères à respecter dans le futur
Manip. traction freinage	Procédure de changement de fonctions complexes en termes de nombre d'actions Action de déverrouillage et du passage par la position 0 systématiques et injustifiés pour changer de fonction Le système de déverrouillage mis en place ne tient pas compte de tous les cas de figure et peut être non pris en compte Le dispositif de traction freinage comprend des fonctions utiles à l'activité principale de régulation de vitesse mais également des fonctions secondaires (inverseur sens de marche,...) La séparation des commandes de freinage électrique et pneumatique peut être remise en cause. Le manipulateur ne permet pas de satisfaire tous les besoins des mécaniciens Le manipulateur permet de conduire indifféremment de la main droite ou de la main gauche.	Le manipulateur de traction sera de type vertical (encombrement mini) à déplacement rotatif La même commande devra intégrer : la traction en mode manuel et en mode VI, le freinage électrique, le freinage électropneumatique, le freinage d'urgence, l'activation de la VACMA Le passage d'un mode à un autre devra être direct, sans action préalable sur une autre commande et quel que soit l'ordre de transition Le passage par 0 s'il est nécessaire ne devra pas impliquer d'actions supplémentaires Une seule action sera nécessaire pour passer d'un mode à un autre et devra être perceptible de manière sensitive (crans, butées) Les efforts mis en jeu lors des manipulations devront être adaptés Le principe de freinage électropneumatique actuel à impulsion devra être conservé.
Manip. traction 0	Retour d'information, indicateur de réussite de l'objectif : mise à 0 du manipulateur	Devra être affiché sur le dispositif d'aide à la conduite Extinction dès que l'on quitte la position 0 Affichage fixe
Inverseur du sens de marche	Utilisée pour les manoeuvres en dépôt (tâche annexe) Le règlement prévoit une limitation de vitesse en marche arrière qui n'est pas gérée ici automatiquement	Placer cette commande hors de la zone du manipulateur de traction freinage et l'isoler de tout autre dispositif Mise en oeuvre de la commande uniquement à l'arrêt Contrôle et réduction automatique de la vitesse Traction régulée par le manipulateur de traction freinage Doit intégrer un dispositif automatique interdisant la marche arrière (rampes) s'il indique marche avant. De même pour la marche arrière.

Tableau 2 : Extrait du tableau de synthèse lié au cahier des charges fonctionnel.

Concernant plus particulièrement les informations sonores liées à la régulation de la vitesse, une étude spécifique a été menée, afin d'établir un cahier des charges, lié à chaque information sonore (ZWOLINSKI et SAGOT, 1996). En utilisant l'analyse fonctionnelle, on a pu formaliser les critères à respecter pour chaque alarme en examinant ses milieux environnants, sa fonction principale (FP) et les fonctions contraintes (FC) liées à son apparition (Figure 19). Ce type de démarche a été très utile, dans la mesure où les sons en cabine doivent être abordés selon leurs caractéristiques physiques et selon des critères d'utilité, de détection, de compréhension et d'appréciation subjective.

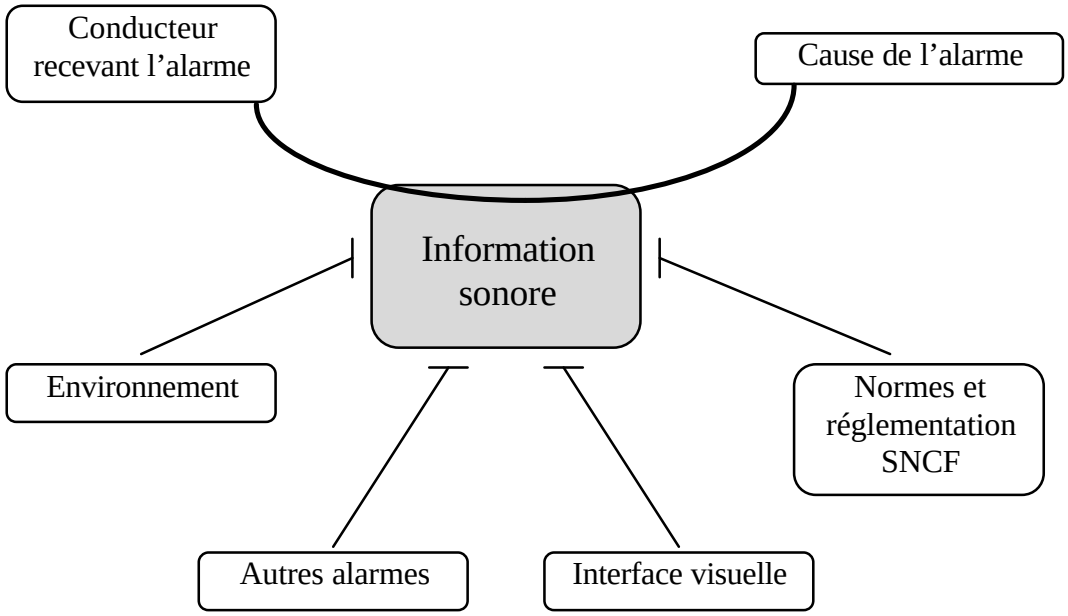


Figure 19 : Exemple de diagramme fonctionnel pour une information sonore.

C'est lors de la validation de chaque fonction (Figure 19), que l'on a pu remettre en cause l'existence de chacune des alarmes ou son évolution (autre mode de présentation de l'information). Suite à la validation de chaque fonction, une liste de critères de valeur a été effectuée. Ces critères permettent de qualifier et de quantifier chaque terme de la fonction remplie par l'information sonore et expriment les niveaux de satisfaction souhaités par les utilisateurs. Ainsi, on a pu réduire le nombre des alarmes ou changer leur mode de présentation. Ces modifications doivent permettre de limiter la charge mentale des agents de conduite en terme de mémorisation et d'assurer une bonne compréhension de la signification des alarmes, essentielle à la conduite sécuritaire.

2.5 Bilan de la phase d'étude de faisabilité

A ce stade de l'étude, un grand nombre d'éléments étaient à la disposition du groupe projet, en vue de démarrer les études préliminaires et dons la phase de définition des préconcepts :

- une bonne connaissance du métier actuel des conducteurs, et de l'activité principale de régulation de la vitesse,
- une vision globale de l'activité future des conducteurs, sur la base de la définition du champ des activités futures souhaitables,
- une définition fonctionnelle des futurs dispositifs liés à la régulation de la vitesse.

Deux questions essentielles se sont alors posées :

- ***Question 1 :*** *A partir de la* ***définition du champ des activités futures souhaitables****, quels sont les dispositifs de conduite à concevoir ?*
- ***Question 2 :*** *Les* ***dispositifs de conduite futurs*** *étant définis et réalisés, quelle est l'activité qui découlera de leur utilisation et comment les optimiser à des fins de sécurité ?*

Nos recherches sur ces questions nous ont amenés ici, à mettre en place une démarche de simulation de l'activité, objet de notre travail de thèse.

En effet, la simulation est apparue comme une réponse naturelle dans la mesure où il est impossible de tester de nouveaux concepts en réel sur un TGV et ceci pour des raisons techniques, budgétaires, temporelles et surtout de sécurité. De plus, en accord avec les travaux de MALINE (1994), nous pensons que si la démarche de simulation de l'activité est mise en place dès l'étape de définition des futurs produits, elle permet d'orienter les choix de conception et de modifier la coopération des acteurs du projet.

C'est ainsi que dès les études préliminaires, nous avons utilisé la simulation de certaines conditions d'exercice de l'activité comme moyen d'action pour la conception lors de la définition et de la mise en oeuvre des préconcepts.

3. LA DEMARCHE DE SIMULATION DE L'ACTIVITE EN PHASE DE DEFINITION ET D'EVALUATION DES PRECONCEPTS

3.1 Objectifs

L'étape de définition et d'évaluation des préconcepts, reste encore trop souvent une étape « réservée » aux ingénieurs. Or, rappelons que c'est bien souvent à ce stade de l'étude, que l'ensemble des recommandations formulées par les différents acteurs du groupe projet doit être pris en compte et intégré pour aboutir à une solution finale acceptable. C'est également à ce stade de l'étude, qu'il est encore possible de faire un grand nombre d'évaluations sur différents préconcepts à l'étude. Ceux-ci vont pouvoir être évalués et comparés, afin de retenir le meilleur compromis au niveau du futur produit, intégrant l'ensemble des critères formulés par le groupe projet.

L'objectif recherché en utilisant une démarche de simulation lors de cette phase est donc de **faire fédérer tous les acteurs du projet** pour aboutir à une **meilleure prise en compte de l'ensemble des recommandations** concernant les dispositifs à l'étude. De plus, la mise en place de la démarche de simulation de l'activité peut aider le groupe projet à se placer dans une optique à la fois prospective et projective (MALINE, 1994), qui permet de **favoriser les prises de décisions** concernant les différents choix au niveau des préconcepts. La démarche adoptée doit ainsi permettre d'optimiser les temps de développements, en éliminant rapidement les pistes de solutions inacceptables d'un point de vue de la technique ou de l'utilisation.

Dans un premier temps, il s'agit de faire adopter au groupe projet **un cadre de référence commun**, qui prend la forme d'un ou de plusieurs **scénarios** explicitant le champ des activités futures souhaitables lors de certaines conditions d'exercice de l'activité. Les différents acteurs du groupe projet, peuvent ainsi réfléchir, compte tenu de leurs compétences propres, aux réponses possibles en termes **d'outils à mettre en place** pour les conducteurs et ceci en relation avec le champ des activités futures souhaitables.

Dans un deuxième temps, après avoir développé un certain nombre de préconcepts, il s'agit de mettre en place des **simulations**, qui ont pour objectif de permettre à l'ensemble du groupe projet, de **vérifier un grand nombre d'hypothèses** formulées lors de la définition des préconcepts. Ceci nous conduit à mettre en scènes différents scénarios liés à certaines conditions d'utilisation des futurs dispositifs en cabine. Nous pourrons réaliser des tests, des

évaluations et des comparaisons entre les différents préconcepts, pour identifier celui qui sera le plus en adéquation avec le champ des activités futures souhaitables des conducteurs.

Ainsi, dans ce chapitre, nous verrons comment le groupe projet a défini différents préconcepts de dispositifs liés à la régulation de la vitesse : ***la commande de traction freinage, le dispositif de commande de la vitesse imposée (VI), les interfaces liées à la régulation de la vitesse et les alarmes sonores*.** Nous montrerons également comment s'est effectuée ***l'implantation des dispositifs sur le pupitre*.** Ces différents exemples vont nous permettre d'illustrer plusieurs techniques qui permettent de prendre en compte certaines caractéristiques de l'activité future des conducteurs en phase de définition et d'évaluation des préconcepts.

3.2 Méthode générale concernant la démarche de simulation en phase de définition des préconcepts

Il s'agit donc ici, de concevoir des préconcepts de dispositifs en adéquation avec les recommandations fonctionnelles, ergonomiques et techniques formulées par le groupe projet, mais également en adéquation avec le champ des activités futures souhaitables défini en phase d'études préliminaires.

En effet, suite à l'étape d'analyses préliminaires, le groupe projet dispose d'un grand nombre de données concernant le futur système. Ce sont ces données que nous avons illustrées Figure 20 sous la forme d'une « boîte noire », dans laquelle nous avons également fait figurer les connaissances liées au champ des activités futures souhaitables. Habituellement, les concepteurs cherchent à ce niveau de l'étude, à organiser et à hiérarchiser ces différentes données dans l'objectif d'apporter des réponses relatives au respect des recommandations jugées les plus pertinentes. Cela se traduit par le respect d'un grand nombre de normes et de recommandations lors de la définition des préconcepts, qui même si il est nécessaire, n'est pas suffisant pour garantir la mise en place de produits fiables et adaptés au mode de fonctionnement de l'homme.

Données sur l'existant
Description des tâches selon les opérateurs, diagnostic ergonomique,...

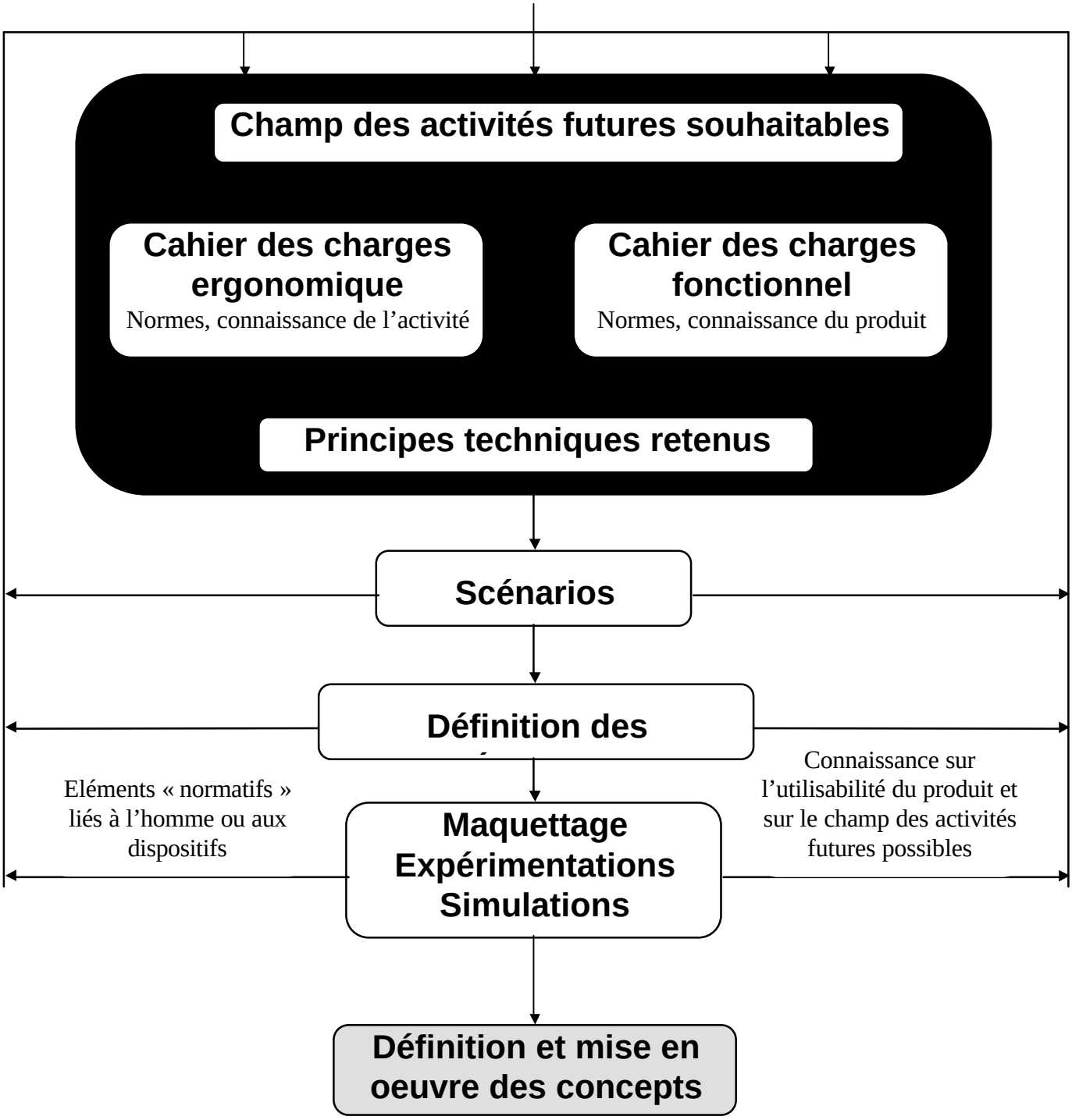

Champ des activités futures souhaitables
Cahier des charges ergonomique
Normes, connaissance de l'activité
Cahier des charges fonctionnel
Normes, connaissance du produit
Principes techniques retenus
Scénarios
Définition des
Eléments « normatifs » liés à l'homme ou aux dispositifs
Connaissance sur l'utilisabilité du produit et sur le champ des activités futures possibles
Maquettage
Expérimentations
Simulations
Définition et mise en oeuvre des concepts

Figure 20 : Démarche générale adoptée lors de la définition et de la mise en oeuvre des préconcepts de dispositifs liés à la régulation de la vitesse des TGV futurs.

En enrichissant les connaissances du groupe projet, grâce à **la définition du champ des activités futures souhaitables**, l'ergonome donne à l'ensemble des acteurs du groupe projet, les moyens de prendre en compte l'ensemble des éléments techniques, fonctionnels,

opérationnels, ergonomiques,..., dans la réflexion qu'ils ont à mener lors de la recherche de solutions. Le groupe projet est ainsi amené à réfléchir aux solutions envisageables, non plus sur la base de réponses à des contraintes, mais sur la base de **scénarios** liés à l'utilisation du produit qui peuvent intégrer l'ensemble des paramètres relatifs au système étudié. Ainsi, le groupe projet va aboutir à la **définition de préconcepts**, qu'il s'agit d'évaluer selon l'ensemble des aspects liés aux produits futurs pour aboutir au choix d'un concept.

Mais l'évaluation de l'utilisabilité des préconcepts, sur la base de l'unique examen des solutions proposées, peut difficilement être effectuée par l'ergonome. En effet, l'évaluation de l'utilisabilité nécessite la mise en place d'expérimentations au cours desquelles les utilisateurs potentiels vont être amenés à utiliser les **maquettes des futurs produits**. Nous avons donc mis en place des **expérimentations** sur maquettes, pour réaliser des simulations partielles de certaines conditions d'exercice de l'activité, afin de permettre aux ergonomes de vérifier un certain nombre d'hypothèses formulées par le groupe projet concernant le champ des activités futures souhaitables.

Les analyses des ergonomes qui portent sur les observations effectuées lors des simulations, vont donc permettre **d'enrichir les connaissances** du groupe projet concernant le champ des activités futures souhaitables mais également concernant les recommandations ergonomiques. En effet, les recommandations générales ergonomiques relatives au produit, sont basées en particulier sur des normes et des standards ergonomiques qui ne fixent que le cadre minimum des exigences permettant de concevoir des situations préservant la sécurité, la santé et le confort de l'homme. Dans la mesure où ces recommandations ne permettent pas de répondre précisément à tous les niveaux des besoins exprimés par les utilisateurs (besoins qui d'ailleurs peuvent ne se révéler qu'au cours de l'usage des produits), il s'agit lors des simulations d'affiner nos connaissances sur ces besoins pour y répondre de manière effective.

Ainsi, lors de cette étape, le groupe projet enrichit et affine ses connaissances au cours des différentes expérimentations qui sont menées. De nombreux va et vient sont ainsi effectués entre la définition, la réalisation et l'évaluation des préconcepts, avant d'aboutir au **choix d'un concept final** concernant chacun des dispositifs.

Ainsi, trois types d'actions contribuent à la définition et à l'évaluation des préconcepts, tout au long de la démarche (Figure 20),:

? **La mise en place d'une démarche participative lors de la recherche de solutions,**

Compte tenu du nombre d'évaluations effectuées lors de cette étape, toutes n'ont pas pu être formalisées, car tous les acteurs du projet étaient pris par le temps. Ainsi, de nombreuses décisions ont été effectuées lors d'entretiens téléphoniques ou lors d'échanges de fax, dans la mesure où l'étroite coopération mise en place a permis d'établir une réelle confiance entre les différents acteurs du projet. Des réunions de synthèse d'une périodicité de 15 jours, permettaient de valider en final l'ensemble des décisions prises par les sous groupes de travail, pour assurer la cohérence du projet.

Il faut souligner que même si la démarche de conception avec les utilisateurs est coûteuse en temps, celle-ci augmente considérablement les chances de réussite du projet. Ainsi, les conducteurs participent non seulement à la conception des futurs outils de travail, mais également à la mise en place de nouvelles méthodes de travail. Ici, ce n'est plus l'utilisateur, qui en final devra s'adapter à l'outil de travail proposé, mais c'est l'outil qui dès les premières phases de conception est défini de manière à être adapté à celui qui en aura la conduite.

? **la mise en place de scénarios,**

Les scénarios permettent la définition d'objectifs, à partir de la représentation que chacun se fait du champ des activités futures souhaitables. La simulation, qui constitue la mise en scène des scénarios, va permettre la définition de besoins, en exploitant les connaissances des utilisateurs (MALINE, 1994)). Afin de justement pouvoir se fixer un certain nombre d'objectifs en fonction de chaque dispositif, nous avons ici construit et utilisé des scénarios pour nous guider lors de la définition des préconcepts. Nous utilisons essentiellement des scénarios comme modèles partiels de l'activité, lors de l'étape de définition des préconcepts, puisqu'à ce stade de l'étude, un grand nombre d'éléments sont à prendre en compte. Par contre, pour ne pas tomber dans le piège du découpage du système étudié en sous système, nous considérons à chaque fois la définition du champ des activités futures souhaitables dans nos recherches de préconcepts, ce qui permet de garder une vision globale du système étudié. Lors des expérimentations, nous utilisons également les scénarios que nous mettons en scène pour illustrer le fonctionnement de chacun des préconcepts étudiés.

? **la mise en place d'expérimentations pour l'évaluation des Interfaces Homme-Machine (IHM).**

Dans la définition des interfaces, il reste difficile d'atteindre d'emblée des spécifications valides. En effet, la prise en compte des facteurs humains déterminant la qualité d'une interface est encore trop peu formalisée pour s'y cantonner. Ainsi, seules des expérimentations avec les conducteurs peuvent permettre aux concepteurs de valider ou de remettre en cause les choix effectués (GARCIA, 1991). C'est ce qui nous amène à utiliser des outils tels que le prototypage rapide d'interfaces, afin d'expérimenter des situations spécifiques avec les conducteurs. Ainsi, les ergonomes peuvent s'appuyer sur les expérimentations pour chercher à enrichir les connaissances du groupe projet concernant les besoins réels liés à l'utilisation des produits, et vérifier les différentes hypothèses liées à l'utilisabilité du produit.

Pour des raisons de clarté, nous décrirons dans la suite de ce chapitre les analyses et la démarche propres à chacun des dispositifs qui constituent le concept lié à la régulation de la vitesse, c'est-à-dire :

? la commande de traction freinage,
? le dispositif de commande de la vitesse imposée (VI),
? les interfaces liées à la régulation de la vitesse,
? les alarmes sonores liées à la régulation de la vitesse.

Ces dispositifs ont été retenus dans la mesure où ils sont directement liés à l'activité de régulation de la vitesse. En effet, rappelons que suite à l'analyse de l'activité de conduite actuelle, la régulation de la vitesse a été identifiée comme l'élément principal de l'activité du conducteur et que cette activité a été retenue comme essentielle au niveau de la définition du champ des activités future souhaitables. Il s'agit donc d'apporter aux conducteurs de futurs TGV, toute l'aide nécessaire dans la réalisation de cette activité de régulation de la vitesse. Nous décrirons également un aspect important qui concerne l'implantation des différents dispositifs en cabine. En effet, comme nous l'avons évoqué précédemment, l'utilisabilité des commandes dépendra également de leur implantation physique au sein du poste de conduite.

Ainsi, après avoir décrit, pour chaque dispositif, les données essentielles retenues par le groupe projet avant l'étape de construction de scénarios, nous décrirons certains préconcepts

ainsi que les maquettes mises en place pour les expérimentations spécifiques qui ont pu être menées. Une discussion générale nous permettra de faire le bilan de cette première partie liée à l'utilisation de la simulation en phase de définition et d'évaluation des préconcepts.

3.3 Le manipulateur de conduite

3.3.1 Hiérarchisation des besoins et définition d'un principe de solution

A. Fonctions et recommandations retenues par le groupe projet concernant la commande de traction freinage

Au cours de différentes réunions, le groupe projet a pu réaliser une synthèse des recommandations fonctionnelles et ergonomiques issues de l'analyse préliminaire. Les compromis établis entre les différentes recommandations ont été formulés de la manière suivante :

- Seules les fonctions utilisées pour l'activité de régulation de la vitesse sont à intégrer au manipulateur : la traction et le freinage rhéostatique, le freinage pneumatique, ainsi qu'une position d'arrêt d'urgence.
- Les changements de consignes se font directement (sans déverrouillage) et la marche sur l'ère, c'est-à-dire sans efforts de traction ou de freinage électrique, doit être possible à tout moment.
- Le manipulateur de conduite est indépendant des commandes suivantes :
    - inverseur du sens de marche,
    - sélecteur du mode de conduite (manuel ou vitesse imposée),
    - commande de couplage-découplage,
    - MP-CO-P (limiteur de puissance).
- Il faut respecter les stéréotypes, être compatible avec les besoins réels des conducteurs, avec la philosophie de l'exploitant (SNCF) et avec les autres utilisateurs (essais, maintenance, CTRA...), rester modulaire et adaptable aux réseaux étrangers,...

Ces différents points ont fait l'objet de nombreuses discussions au sein du groupe projet, dans la mesure où certaines recommandations sont incompatibles. Ainsi, un compromis a dû

être établi concernant les grandes fonctions à respecter, sans entrer dans les détails techniques du projet qui ont été examinés dans un deuxième temps.

B. Caractéristiques techniques

La mise en place d'un manipulateur de conduite, intégrant l'ensemble des fonctions de traction/freinage actuelles, a amené le groupe projet à réfléchir à plusieurs préconcepts de types manipulateurs circulaire, rotatif et linéaire. Ces types de manipulateurs permettent au conducteur d'accéder à différentes plages de réglage qui correspondent aux différents modes de traction/freinage. Mais plusieurs de ces propositions, qui présentaient l'intérêt de donner au conducteur une référence spatiale concernant le niveau d'efforts de traction/freinage demandé, n'ont pu être retenues. En effet, l'analyse de l'activité a montré que les conducteurs souhaitent pouvoir régler leur vitesse au km/h près. Les études liées à l'encombrement des diverses solutions ont alors montré que les principes de solution retenus induisaient des courses trop importantes de la commande, découlant du degré de précision souhaité par les conducteurs au niveau des réglages des efforts de traction freinage. Une contrainte supplémentaire est également apparue, dans la mesure où la mise en place du manipulateur sur le pupitre ne pouvait en aucun cas engendrer d'ouverture dans le pupitre, par crainte d'éventuels obturations et coincements de la commande.

Ainsi, en accord avec les conclusions de l'analyse de l'activité de conduite actuelle et les aspects techniques, le groupe projet a établi un compromis : un manipulateur de traction/freinage de type impulsionnel. Ce type de manipulateur a pour principal intérêt d'avoir un faible encombrement et une grande précision, en respectant les contraintes techniques liées à la sécurité formulées par GEC ALSHOM. Les préconcepts doivent donc permettre de régler l'intensité des efforts de traction et de freinage du T.G.V., en fonction de la durée des appuis impulsionnels effectués par le conducteur sur la commande. Une interface précise concernant les efforts de traction et de freinage est prévue pour pallier à l'absence d'une référence spatiale donnée par la commande.

3.3.2 Les scénarios

En faisant référence aux situations de conduite actuelles concernant l'utilisation du manipulateur, le groupe projet a pu identifier des situations d'actions caractéristiques qui ont été décrites sous forme de scénarios. Ces scénarios ont été mis en place avec les conducteurs,

suite au recueil d'un grand nombre de données lors de verbalisations. Une fois construits, les scénarios étaient validés par le groupe projet, afin que chacun puisse prendre conscience des différents cas de figure existants.

Concernant le manipulateur, les situations caractéristiques ont concerné les phases de ralentissement et d'arrêt en gare (exemple de scénario Figure 21), les phases de démarrage (en pente ou non), les phases de maintien d'une vitesse,...

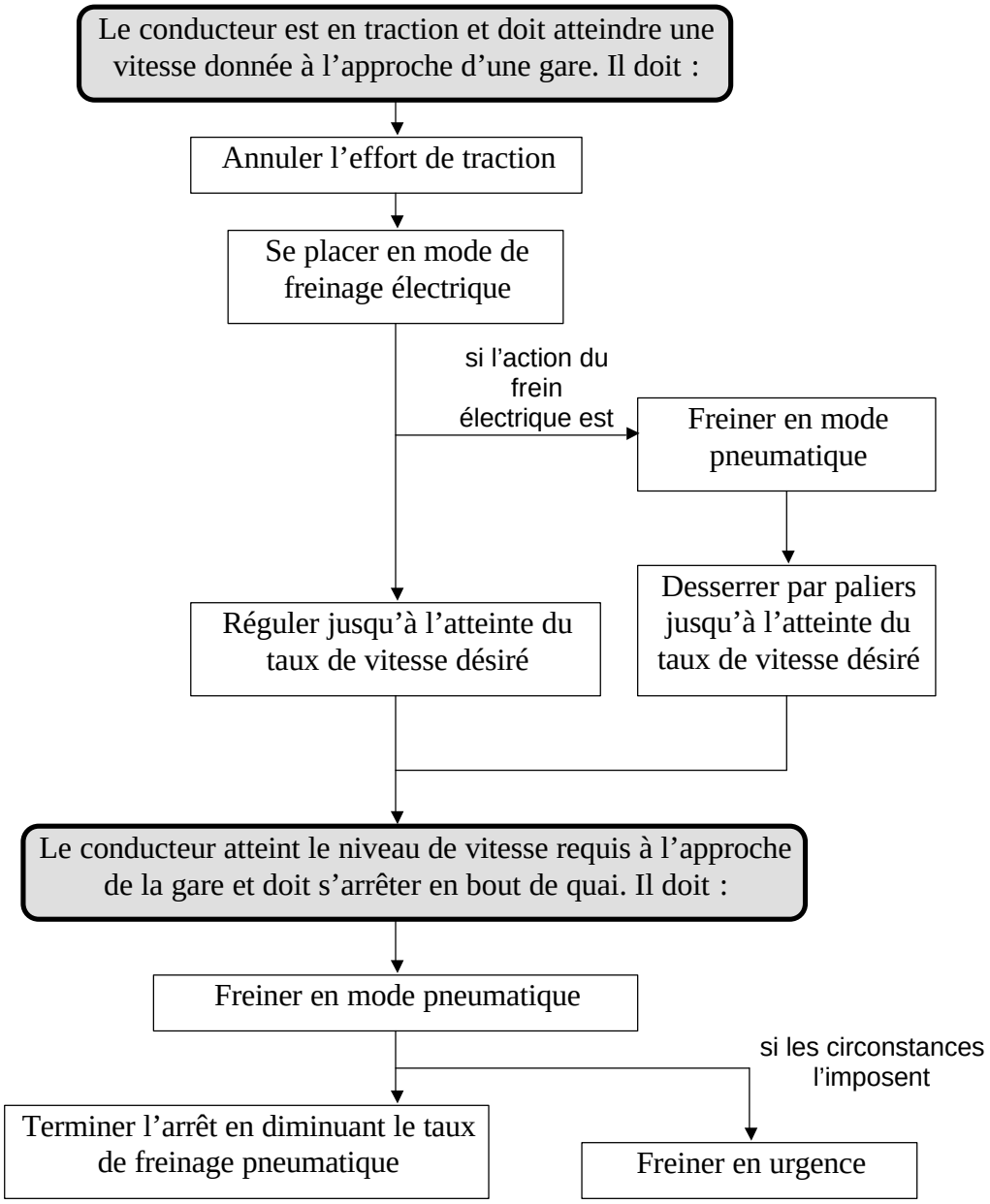

Le conducteur est en traction et doit atteindre une vitesse donnée à l'approche d'une gare. Il doit :
Annuler l'effort de traction
Se placer en mode de freinage électrique
si l'action du frein électrique est
Freiner en mode pneumatique
Desserrer par paliers jusqu'à l'atteinte du taux de vitesse désiré
Réguler jusqu'à l'atteinte du taux de vitesse désiré
Le conducteur atteint le niveau de vitesse requis à l'approche de la gare et doit s'arrêter en bout de quai. Il doit :
Freiner en mode pneumatique
si les circonstances l'imposent
Terminer l'arrêt en diminuant le taux de freinage pneumatique
Freiner en urgence

Figure 21:Scénario envisageable lors des phases de ralentissement et d'arrêts en gare.

Les différents scénarios ont constitué un support pour le groupe projet, qui a pu décrire l'ensemble des configurations possibles, les conditions de passages d'un mode de traction ou de freinage à un autre mode,...

Nous avons ainsi réfléchi sur la structure à donner au manipulateur et identifié les différentes positions nécessaires pour le bon déroulement de l'activité de régulation de la vitesse. Nous avons ainsi proposé différents préconcepts et retenu la configuration Figure 22, lors d'une dernière réunion de synthèse.

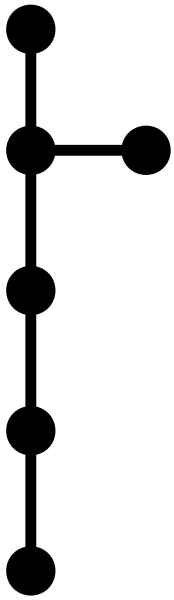


Figure 22 : Repères et positions du manipulateur traction-freinage.

<u>Positions adoptées dans un plan vertical orienté vers le conducteur :</u>

? Plus : position instable (retour vers la position Stop) et butée.

Cette position permet au conducteur d'augmenter l'effort de traction ou de diminuer l'effort de freinage électrique et l'effort de freinage pneumatique.

? Stop : position stable.

Cette position est en quelque sorte le point neutre du manipulateur.

? Moins : position instable (retour vers la position Stop) et butée franchissable vers Fcg.

Cette position permet au conducteur de diminuer l'effort de traction ou d'augmenter l'effort de freinage électrique et l'effort de freinage pneumatique.

? Fcg : position instable (retour vers la position Stop) et butée franchissable vers URG.

Cette position permet au conducteur d'activer le mode freinage pneumatique et d'augmenter l'effort de freinage pneumatique.

? URG : position stable.

Cette position correspond au freinage d'urgence (activation automatique du freinage électrique et pneumatique maximum). Deux boutons-poussoirs disposés de chaque côté du pupitre permettent également d'obtenir le freinage d'urgence.

Position adoptée dans un plan vertical, perpendiculaire au plan précédent :

? '0' : position instable (retour vers la position Stop).

Permet de remettre à zéro l'effort de traction et de freinage électrique

Bouton :

? 'T' (Traction) : Bouton-poussoir à une position stable, situé sur la commande, (appui possible dans toutes les positions de la commande).

Il permet de déverrouiller la commande de traction pour passer en mode traction quand l'effort initial est à 0. Il permet également de commander un effort de traction tout en conservant l'effort de freinage pneumatique auparavant défini (cas du démarrage en rampe).

A noter, qu'il n'existe pas de procédure particulière pour passer en mode de freinage électrique, puisqu'il s'active lorsque l'on se place dans la position MOINS après que l'effort de traction soit annulé.

Afin de pouvoir répondre aux attentes formulées par les conducteurs concernant les aspects de la régulation fine ou rapide de la vitesse, le groupe de travail a intégré des conditions qui font varier le calcul des demandes de traction et de freinage, en fonction du temps de l'impulsion sur le manipulateur et du niveau de traction ou de freinage déjà établi.

3.3.3 Réalisation de la maquette

La mise en commun des connaissances des utilisateurs, des constructeurs et des ergonomes a ainsi permis de retenir un préconcept concernant le manipulateur de traction freinage. Nous avons demandé à l'établissement GEC ALSTHOM de Tarbes, de développer une maquette fonctionnelle du futur manipulateur de traction freinage (Figure 23), afin de pouvoir effectuer des expérimentations avec les conducteurs.

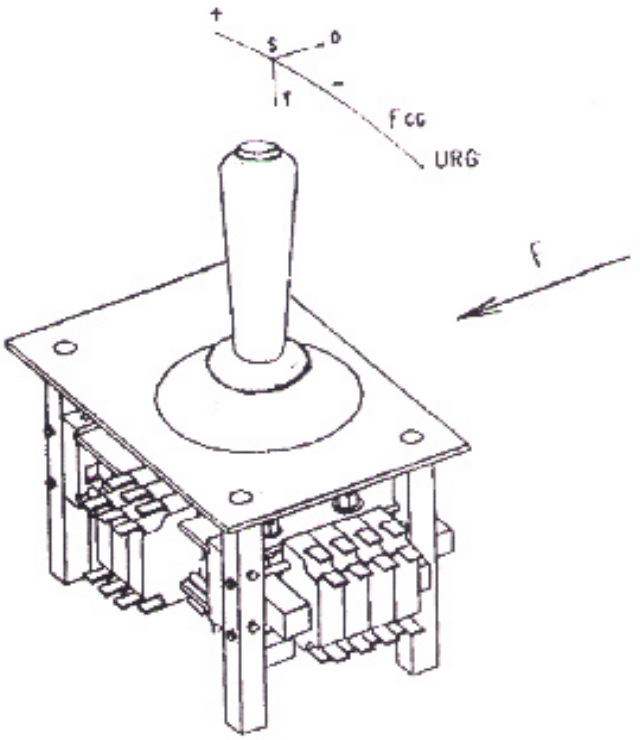


Figure 23 : Vue de la maquette prototype du manipulateur de traction freinage.

Comme le montre la Figure 23, c'est pratiquement un prototype qui a été développé par GEC ALSTOM, dans la mesure où la maquette a été réalisée en répondant à l'ensemble des contraintes techniques, qui seront appliquées sur le dispositif final. En fait, les personnes qui ont travaillé sur la maquette avaient déjà à l'esprit un grand nombre de solutions techniques. Les concepteurs ont ainsi préféré les intégrer dès à présent sur la maquette du manipulateur afin de les tester et de gagner du temps sur les futurs développements.

Il s'est avéré que l'intégration de toutes ces recommandations, ont quelque peu figé la maquette du manipulateur, en ne nous donnant pas tous les degrés de liberté nécessaires lors de la passation des tests. Nous avons donc fait venir les concepteurs de Tarbes pour réaliser quelques aménagements de la maquette. Il nous a ainsi été possible de modifier plusieurs éléments sur manipulateur et en particulier ceux touchant aux efforts de manipulation de la commandes et ceux liés à la mise en place de l'enveloppe de la poignée. Nous avons ainsi pu commencer nos premières expérimentations sur la maquette.

3.3.4 Mise en place des expérimentations

Deux types d'expérimentations ont été mis en place au niveau du manipulateur :

- afin de pouvoir affiner les valeurs des efforts à fournir pour actionner le manipulateur dans ses différentes positions,
- afin d'améliorer la prise en main de la commande, en définissant une enveloppe adaptée à l'activité menée.

A. Banc d'essai concernant les efforts de manipulation

(i) Objectif

Dès la réception de la maquette du manipulateur, nous nous sommes rendus compte que les efforts à fournir pour basculer d'une position à une autre étaient de manière générale supérieurs à 1 kg (Figure 24). Cette étape a donc pour objet la détermination d'une plage d'efforts adaptée au mode d'utilisation du manipulateur. Elle nous a conduit à apporter des modifications sur la maquette en vue d'une évaluation globale ultérieure, qui concernera l'ensemble des dispositifs

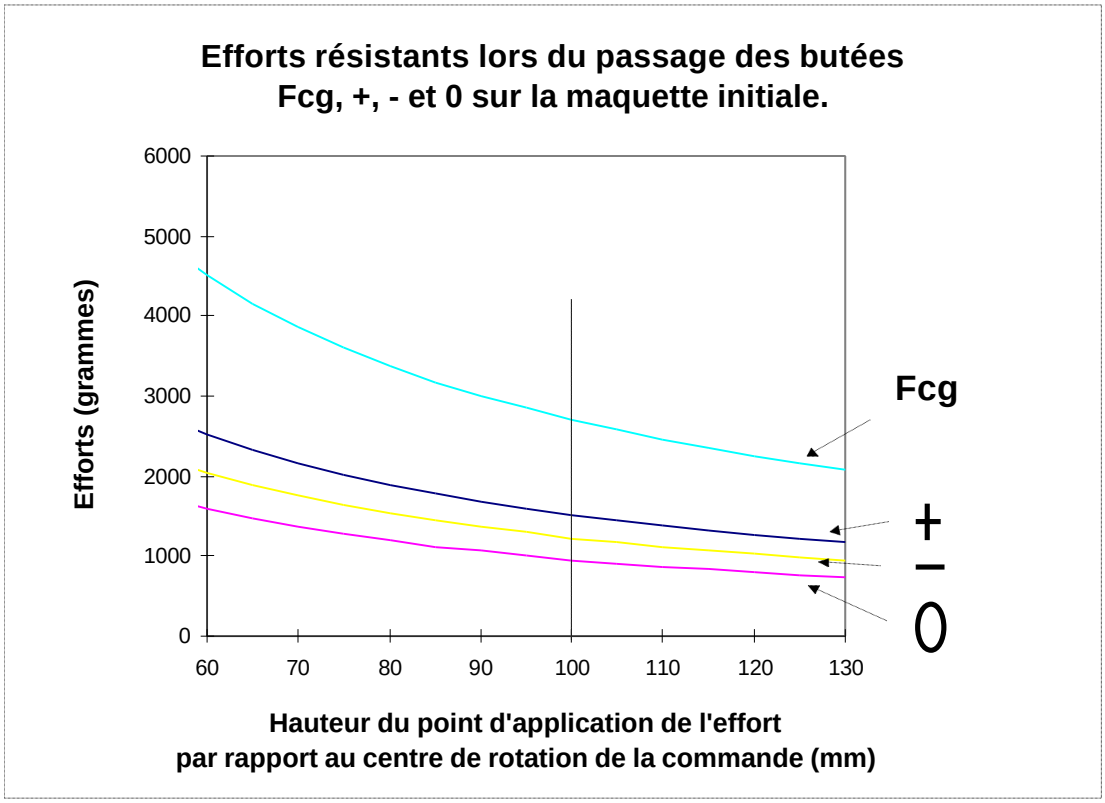


Figure 24: Efforts à fournir pour manipuler la commande de traction freinage de la maquette initiale dans ses différentes positions.

Dans un premier temps, nous avons donc choisi de mettre en place un protocole portant sur l'évaluation subjective des efforts à fournir par les utilisateurs. Pour compléter notre approche expérimentale, nous nous sommes appuyés sur les normes existantes.

Or, nous nous sommes vite rendus compte que d'un point de vue bibliographique, il n'existe que très peu de normes voire d'études concernant les efforts sur les commandes. Nous nous sommes cependant inspirés des documents suivants :

? La norme NF X35-105 (AFNNOR, 1995), qui présente les dimensions des commandes, le type de commandes à retenir en fonction des spécifications fonctionnelles, les limites d'efforts recommandées pour l'action sur les commandes,...

? Le guide d'ergonomie, adaptation de la machine à l'homme dans lequel WOODSON et CONOVER (1978), ont évalué les efforts résistants qu'il conviendrait d'utiliser pour les commandes à deux dimensions, de type « manche », utilisées dans les avions monoplaces.

Rappelons que le respect de ces normes est nécessaire, mais qu'il n'est pas suffisant pour garantir la mise en place de produits fiables et adaptés au mode de fonctionnement de l'homme. C'est essentiellement la partie expérimentale qui nous permet de conclure quand au jeu d'efforts à mettre en place

(ii) Déroulement des expérimentations.

Le prototype de manipulateur réalisé par GEC ALSTHOM, est placé sur un support réglable en hauteur, fixé sur une table (Figure 25). La commande passe au travers du plateau de la table (hauteur de dépassement de 150 mm). Des manettes de différentes hauteurs ont été réalisées, afin de pouvoir faire varier les efforts en jouant sur le bras de levier. Ce dispositif permet d'obtenir différents efforts, dans une configuration identique aux yeux de l'utilisateur.

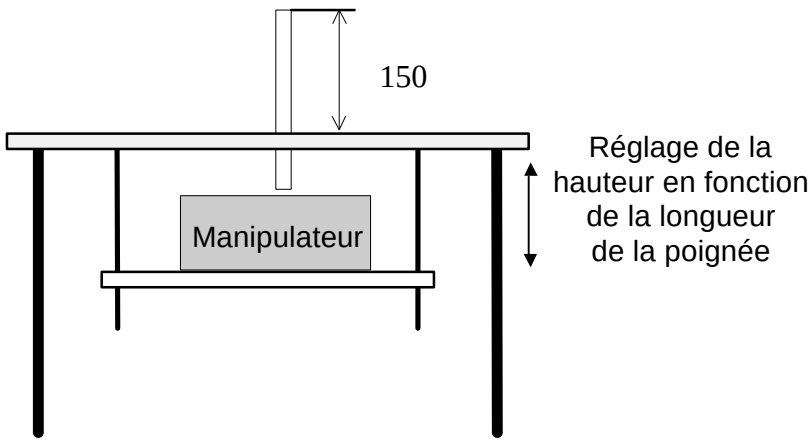


Figure 25 : Dispositif mis en place pour l'essai du manipulateur.

Pour ne pas alourdir le protocole dans cette phase de pré-études, nous avons décidé de prendre cinq sujets témoins, non conducteurs de TGV. Ces personnes sont âgées de 35 à 45 ans afin d'être représentatives au niveau de l'âge et des efforts mis en jeu par rapport à une population de conducteurs TGV. Ces sujets ont eu pour consigne de s'installer confortablement (réglage de la position du siège et de sa hauteur), afin d'actionner la poignée du manipulateur. Nous leur avons demandé d'utiliser les différentes positions du manipulateur après leur avoir expliqué les fonctions des différentes positions.

Nous avons ainsi pour chaque sujet :

- relevé la position de la main sur le manche,
- évalué les efforts souhaitables en position 0,+ et - , pour la régulation des efforts,
- évalué les efforts souhaitables au passage des différentes butées permettant d'accéder à la position Fcg et URG.

(iii) Résultats de cette première étape d'évaluation.

Nous avons recueilli pour chaque sujet les valeurs qui semblent le mieux leur convenir lors de la manipulation de la commande dans ses différentes positions. Nous avons ainsi obtenu des plages de valeurs d'efforts dans lesquelles il convient de se situer pour assurer un certain confort d'utilisation de la commande. On peut déjà souligner ici, que les efforts déterminés d'un point de vue subjectif par les différents sujets, sont largement inférieurs aux valeurs limites indiquées par la norme NF X35-105 (AFNOR, 1995), puisque celles-ci représentent des limites acceptables, mais ne prennent pas en compte la notion de confort d'utilisation.

Par contre, les plages identifiées lors des expérimentations restent assez larges et ne permettent pas de cibler une configuration d'efforts. Ainsi, afin de pouvoir affiner les résultats liés aux efforts à effectuer lors de la manipulation, le groupe projet a choisi de procéder dans une phase ultérieure à des essais impliquant cette fois-ci les conducteurs de trains et prenant en compte l'activité de conduite. Pour procéder à ces essais dans les meilleures conditions possibles, et en accord avec les concepteurs de la maquette, il a été décidé de cibler deux configurations d'efforts différentes en accord avec les choix effectués par nos sujets lors de la pré-expérimentation. Ces configurations d'efforts retenues, indiquées dans le **Tableau 2**, sont représentatives des choix effectués lors de la pré-expérimentation.

	CONFIGURATION 1 (Point d'application de l'effort à 100 mm)	**CONFIGURATION 2** (Point d'application de l'effort à 120 mm)	**Valeurs max. données par la norme NF X 35-105**
Action vers +	1400g	960g	4500 g
Action vers -	1100g	1050g	4000 g
Action vers 0	860g	950g	2500 g
Passage butée Fcg	2545g	3500g	5800g
Passage butée URG	6000g	6000g	15000g

Tableau 2 : Configurations des efforts à mettre en place pour les futurs essais sur la maquette et valeurs max. données par la norme NF X 35-105.

Sur la base de ces configurations d'efforts, nous avons demandé aux établissements GEC ALSTHOM de Tarbes de réaliser les adaptations techniques sur la maquette du manipulateur. Ils ont ainsi réalisé des jeux de cames interchangeables sur le manipulateur, qui permettent d'assurer différents efforts résistants lors du passage d'une position à une autre. Les autres efforts sont réglés par l'ajout, l'enlèvement ou la modification de ressorts de rappel du dispositif (ressorts de fin de course ou ressorts des contacteurs électriques).

Si le réglage des efforts liés à l'utilisation de la commande permet d'apporter un certain confort à l'utilisateur, la forme de l'enveloppe de la commande doit également contribuer à une meilleure utilisation. Nous nous sommes donc intéressés dans un deuxième temps à la définition et à la réalisation d'une enveloppe de commande adaptée à la prise en main, dans le cadre de l'activité de conduite d'un TGV.

B. Définition et réalisation de l'enveloppe du manipulateur.

(i) Objectifs

L'étude du manipulateur de conduite, organe principal de conduite, a nécessité une étude de préconcepts concernant la forme de l'enveloppe du manipulateur. L'objectif ici, est de pouvoir réaliser une enveloppe à monter sur la maquette de la nouvelle commande, en prenant en compte les contraintes liées à sa future fabrication et à son utilisation : être solide et résistant à environ 50 daN, usinable, agréable au toucher,...

(ii) Méthodes

Sur la base des scénarios précédemment définis, nous avons pu identifier les fonctionnalités les plus fréquemment utilisées sur le manipulateur ainsi que le mode de passages d'une position à une autre. Nous avons alors cherché à identifier avec les conducteurs la manière avec laquelle ils seront amenés à prendre la commande en main lors de ces différents cas d'utilisation. Dès lors, nous avons mis en place des formes de manipulateur permettant de favoriser les différents cas d'utilisation de cette commande (manipulation du bout des doigts, arrêt d'urgence, fonction repose main, empreinte de la main, prise en main rapide,...). Les réflexions menées avec les conducteurs concernant les différents cas de prise en main possibles, nous ont amenées à réaliser cinq modèles d'enveloppes (exemple Figure 26) dans un matériau type clay et/ou en polystyrène. Lors des réalisations, nous nous sommes appuyés sur les connaissances actuelles concernant l'anthropométrie de la main (DECOSTER, 1982), ainsi que sur le savoir actuel dans le domaine des commandes d'aviation, d'engins de chantiers,...(WOODSON et CONOVER, 1978). Nous avons également pris en compte les critères relatifs à la future implantation de la commande sur le pupitre, dans la mesure où plusieurs dimensions de cette commande dépendent de son implantation. Nous détaillerons plus loin, comment s'est effectuée cette étude d'implantation des différents dispositifs étudiés (manipulateur, dispositif de vitesse imposée, écrans en cabine,...), qui s'est déroulée parallèlement à l'étude spécifique de chacun des dispositifs étudiés.

Une personne de la SNCF, appartenant au groupe projet a pu soumettre les différentes maquettes des préconcepts à un grand nombre de conducteurs. Les cinq modèles d'enveloppes de commandes ont ainsi été présentés à 40 conducteurs du dépôt de Tours, sensibilisés ou non à l'utilisation d'un manipulateur en cabine de conduite ferroviaire. Ils ont ainsi eu à classer les modèles selon leur préférence et à faire part de leurs remarques. Un modèle sur les cinq a particulièrement retenu l'attention de l'ensemble des conducteurs interrogés, dans la mesure où il représente un bon compromis en réponse aux différents cas d'utilisation de la commande. Nous avons donc choisi de réaliser le prototype fonctionnel de cette enveloppe, en vue de la tester de manière plus approfondie dans les phases d'évaluation ultérieures.

(iii) Enveloppe retenue concernant le manipulateur de traction freinage

Nous avons mis en oeuvre l'enveloppe choisie, que nous avons ajustée en fonction des commentaires recueillis auprès des conducteurs (accessibilité du bouton, position du pouce,...). Ces ajustements ont été réalisés lors de la confection d'un modèle polystyrène, qui nous a permis de confectionner le modèle CAO de l'enveloppe.

Figure 26 : Modèle final d'enveloppe retenu pour le futur manipulateur. A gauche le modèle clay pour les tests. A droite le modèle polystyrène pour la modélisation CAO.

L'étape de modélisation CAO a été rendu nécessaire pour deux raisons :

? elle a fait gagner un temps considérable lors de la prise en compte des évolutions successives de l'enveloppe. En effet, il aurait été difficile d'effectuer les modifications de la commande sur la base de la confection des modèles à la main (modèle clay), dans la mesure où nous n'aurions pas su si les modèles successifs reproduisent exactement les caractéristiques non modifiées du modèle précédent,

? la mise à disposition d'un modèle CAO 3D de l'enveloppe finalement retenue a permis de générer un fichier pour effectuer le prototypage en CFAO de la commande finale. Nous avons ainsi pu usiner un prototype massif de l'enveloppe de la commande en résine bois type ciba-tool.

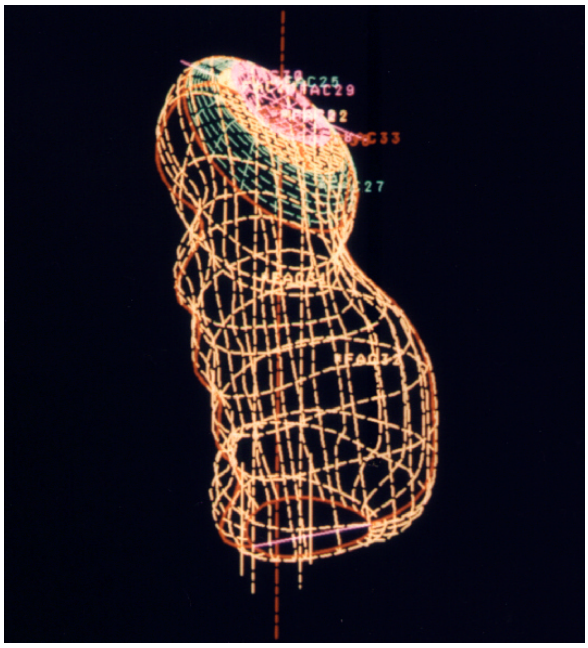


Figure 27 : Modèle CAO obtenu de la commande retenue.

Après l'obtention du prototype massif en résine bois type ciba-tool, la pièce a été préparée pour le moulage silicone. La pièce finale (Figure 28) a ainsi pu être coulée en polymère noir en vue de l'obtention du prototype qui a servi aux évaluations finales sur le simulateur.

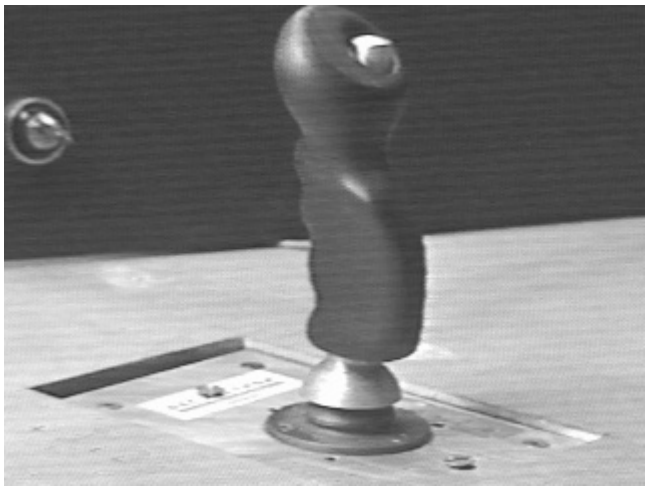


Figure 28 : Prototype fonctionnel du manipulateur de traction freinage.

Ainsi, la commande de traction freinage ci-dessus définie, n'intègre plus que les fonctions essentielles à la conduite. Le dispositif de réglage de la vitesse butée, qui n'est pas utilisé par tous les conducteurs, n'est donc plus présent sur la commande principale de traction freinage.

Pourtant, ce dispositif participe également à la régulation de la vitesse lorsque le conducteur choisi de l'utiliser. Il a donc fait l'objet d'une étude spécifique.

3.4 Le dispositif de vitesse butée

La future commande de traction freinage, telle qu'elle a pu être définie ci-dessus, n'intègre plus le dispositif de réglage de la vitesse butée. En effet, la fonction remplie par ce dispositif a été considérée comme annexe dans la mesure où son utilisation est ponctuelle. Elle a donc été identifiée comme non prioritaire pour figurer sur la commande principale de régulation de la vitesse, ce qui nous a amené à réfléchir à sa définition future.

3.4.1 Hiérarchisation des besoins et définition d'un principe de solution

A. Fonctions de la vitesse imposée (VI)

Le groupe projet a insisté sur le fait que le dispositif de vitesse imposée doit respecter les critères suivants :

- permettre la sélection précise d'une vitesse,
- assurer de manière effective le non dépassement de la vitesse butée,
- afficher l'information sur l'IHM de régulation de la vitesse.

B. Caractéristiques techniques retenues

La diversité des lignes n'a pas permis au groupe projet de pouvoir envisager une gestion automatique complète ou partielle de la vitesse imposée, dans la mesure où le coût financier des infrastructures à mettre en place serait considérable. De plus, selon les stratégies des conducteurs, la vitesse imposée peut être utilisée comme simple butée ou comme aide à la conduite dans des phases de ralentissement. Il a donc été décidé de laisser le choix aux conducteurs concernant l'utilisation ou la non utilisation de la VI. Par contre, afin de pallier aux difficultés de réglage du système actuel (levier à bague rotative), et du fait de l'intégration de l'informatique aujourd'hui considérée comme techniquement fiable au sein des postes de conduite, le groupe projet a décidé d'utiliser un principe de clavier avec afficheur, permettant la saisie exacte de la vitesse imposée. La présence de l'électronique et de l'informatique va interdire ici, les dépassements de la vitesse imposée qui apparaissent actuellement sur des

parcours à forte déclivité, comme cela a été montré lors de l'analyse de l'activité (BOLLON et coll., 1992).

3.4.2 Le scénario

Le scénario lié à l'utilisation de la VI a été envisagé avec les conducteurs et l'on a ainsi pu déterminer deux cas concernant la future utilisation de la VI (Figure 29), le cas où le conducteur exécute la commande de changement de VI directement et le cas où le conducteur anticipe un changement de consigne mais attend le moment favorable pour l'appliquer.

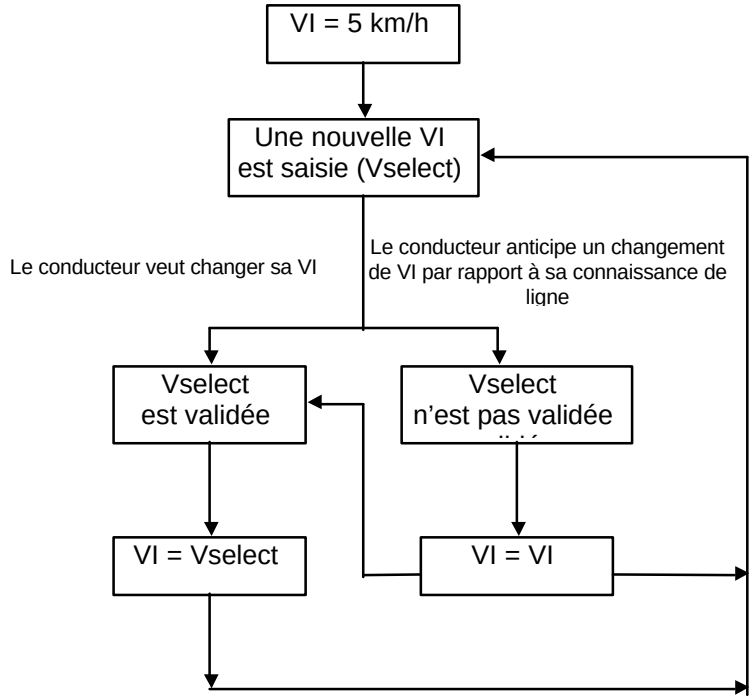

VI = 5 km/h
Une nouvelle VI est saisie (Vselect)
Le conducteur veut changer sa VI
Le conducteur anticipe un changement de VI par rapport à sa connaissance de ligne
Vselect est validée
Vselect n'est pas validée
VI = Vselect
VI = VI

Figure 29: Organigramme lié à l'utilisation du dispositif de vitesse imposée.

Sur la base de cet organigramme, nous avons pu préciser les différentes options que doit intégrer le système de réglage de la VI. Lors de nos entretiens avec les conducteurs, nous avons ainsi mis en évidence que l'interface liée au réglage de la VI peut être uniquement constituée d'un pavé numérique, complété d'une touche d'affichage et de validation. Il est donc apparu inutile d'ajouter au sein du poste de conduite, un clavier dédié au réglage de la VI, dans la mesure où un clavier possédant un pavé numérique existe déjà au niveau du poste de conduite et permet de consulter le guide de dépannage de la motrice.

Nous avons donc fait valider par l'ensemble du groupe projet, le fait que le clavier de la VI devra être intégré sur le clavier déjà existant. Cependant, afin de pouvoir valider les nouvelles

fonctionnalités de la VI (affichage, préréglage,...), nous avons réalisé une maquette intégrant le clavier numérique, pour les futures évaluations.

3.4.3 Réalisation de la maquette

Nous avons développé un boîtier spécifique pour le réglage de la VI, afin de pouvoir évaluer ses nouvelles fonctionnalités. Nous nous sommes appuyés ici, sur le scénario précédemment défini, ainsi que sur les normes concernant les tailles et l'espacement des caractères et des boutons. Nous avons ainsi mis en oeuvre le dispositif temporairement mis en place pour les futurs essais (Figure 30).

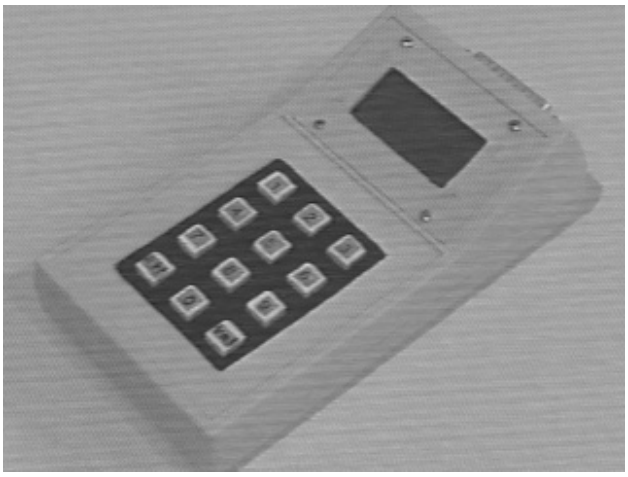


Figure 30 : Maquette fonctionnelle du boîtier de Vitesse Imposée (VI).

Dans le cas du développement du boîtier de VI, ce sont essentiellement les nouveaux dispositifs techniques installés sur la rame, permettant une mesure précise de la vitesse réelle, qui révolutionnent son principe. En effet, dans les zones de faible déclivité, le dispositif de vitesse imposée peut maintenant être considéré comme un pilotage automatique ou du moins comme une bonne assistance à la conduite, puisqu'il agit réellement comme une butée, quelle que soit la déclivité du terrain. Par contre, il ne constituera toujours pas une aide totalement efficace dans les zones de forte déclivité, puisqu'il ne sait pas gérer une modulation des efforts « en douceur » et peut provoquer un certain inconfort au niveau des passagers (vitesse très irrégulière). Son principe d'utilisation reste donc toujours le même puisque le conducteur a juste à sélectionner la vitesse voulue, à la différence près qu'il l'obtiendra au moins aussi rapidement qu'avec l'ancien système et que le réglage s'effectuera au km/h près. Il n'a donc pas été envisagé de pré-expérimentations avec les conducteurs concernant ce dispositif de VI.

Par contre son utilisabilité sera examinée par la suite, en relation avec les interfaces visuelles sur lesquelles seront présentées certaines informations qui concernent la VI.

3.5 Les interfaces visuelles liées à la régulation de la vitesse

Sur la base de l'analyse de l'activité menée dans le cadre de la conduite TGV, qui a mis en évidence que la conduite est principalement une activité de régulation de la vitesse, le groupe projet a retenu les constats suivants :

- Pour exécuter sa tâche, le conducteur dispose de connaissances sur le fonctionnement de la machine, sur ses capacités, sur la réglementation, sur la signalisation, mais aussi des connaissances plus spécifiques qui concernent les caractéristiques de la ligne.
- Le comportement et les stratégies des conducteurs dépendent de leur niveau d'expertise.
- Les connaissances sont organisées selon un format linéaire, du début du trajet à la fin du trajet.
- Une faible connaissance de ligne modifie le prélèvement de l'information et le comportement du conducteur. Le conducteur « inexpérimenté » sur un trajet n'utilise pas et ne recherche pas les mêmes informations.
- Le conducteur, pour anticiper, prend en compte les informations visuelles dont il dispose à un temps T afin de prévoir l'évolution de l'environnement à un instant T1.
- Les conducteurs se représentent mentalement à partir de leurs connaissances, les résultats de leurs actions sur la machine.
- Les conducteurs disposent d'une représentation mentale de l'évolution de l'environnement.
- Les conducteurs expérimentés effectuent un tri sélectif des informations pertinentes. Les informations visuelles sont prélevées uniquement lorsqu'ils en ont besoin.

Il faut donc tenir compte de l'ensemble de ces données qui viennent enrichir et préciser la définition de l'activité future souhaitable des conducteurs, puisque la définition des futures interfaces visuelles va reposer sur ces éléments de base. Une fois les interfaces définies, les conducteurs seront sollicités, car une validation est nécessaire, afin de vérifier que l'on a bien intégré lors de la conception des interfaces, l'ensemble des aspects précédemment cités.

3.5.1 Hiérarchisation des besoins et définition d'un principe de solution

A. Fonctions des interfaces visuelles

Les recommandations prioritaires, identifiées par le groupe projet, indiquent que les interfaces doivent :

- permettre d'afficher les vitesses à respecter, la vitesse réelle, les contraintes autres, ...,
- permettre d'afficher les informations liées à l'effort de freinage et de traction (incidents, manomètres, ampèremètres,...),
- être adaptables par rapport aux souhaits de l'ADC et au système de communication Sol-Train des réseaux étrangers (Allemagne, Belgique, Pays-Bas, Angleterre,...),
- permettre une détection rapide et éviter de restructurer les informations à l'intérieur de la cabine,
- présenter des informations faciles à interpréter afin de limiter la charge de travail mentale des conducteurs.

B. Caractéristiques techniques

Si on considère les contraintes futures :

- nombre croissant d'interfaces à la diversité des pays traversés par un même train
- nombre croissant d'informations en cabine (vitesse conseillée, effort de traction...),
- et évolutions à venir nécessitant de nouvelles installations de dispositifs et d'interfaces,

on va rapidement tendre, si on garde l'option de construire en "hard", vers un pupitre extrêmement chargé, voire un manque probable de place, un coût excessif à chaque nouvelle modification technique, une détection et un traitement des informations nécessaires à la régulation de la vitesse de plus en plus long, des risques de confusions et d'erreurs humaines croissants,...

De plus, le critère essentiel à intégrer est de rendre compatible vers le bas et vers le haut l'interface future de régulation de la vitesse (par omission ou ajout de certaines informations disponibles). Une interface "enrichissable" ou "appauvrissable" doit être rendue possible en

fonction du type de ligne, du dispositif de communication Sol-Train. Elle doit également permettre d'intégrer au fur et à mesure des évolutions futures, les nouvelles informations.

L'ensemble des membres du groupe projet a donc été amené à faire le choix d'une interface de type logiciel ("soft"), afin d'assurer la mise en place d'un outil dont l'obsolescence sera très fortement réduit, à long terme, par rapport à une construction physique ("hard").

Les recherches dans le domaine des interfaces « soft » nous ont orienté vers des systèmes techniques de type écrans informatiques en cabine. Ce mode de présentation des informations sur écrans a été facilement accepté par le groupe projet qui comprend les conducteurs. En effet, l'acceptation de ce nouveau concept a été favorisée par le fait que d'autres applications existent déjà sur les trains Allemands, ainsi que pour la supervision de la circulation des trains maglev à grande vitesse (MÜLLER et SCHNIEDER, 1994).

Une fois la solution « écran » retenue pour l'ensemble des informations visuelles, il s'agissait pour les ergonomes de définir le contenu des interfaces visuelles futures. Nous avons donc constitué plusieurs scénarios liés à la prise d'informations lors de situations de conduite caractéristiques, afin de préciser les informations utiles au conducteur.

3.5.2 Les scénarios

Sur la base de nos connaissances concernant l'activité de conduite actuelle des TGV et de la définition du champ des activités futures souhaitables des conducteurs, nous avons listé l'ensemble des informations visuelles à présenter dans le futur. Nous avons ainsi pu identifier avec les conducteurs, le type d'informations à conserver dans les futures interfaces et les conducteurs ont pu réfléchir au déroulement de leur prise d'informations au sein des futurs TGV. Nous avons ainsi construit des scénarios liés à la prise d'informations visuelles (exemple Figure 32), en fonction des types de lignes rencontrées (lignes grandes vitesse, lignes classiques,..), ou de séquences d'actions à mener (arrêts en gare, phase de freinage, travaux,...). En fonction des différents cas étudiés, nous avons pu établir la liste des informations utiles aux conducteurs dans le poste de conduite futur.

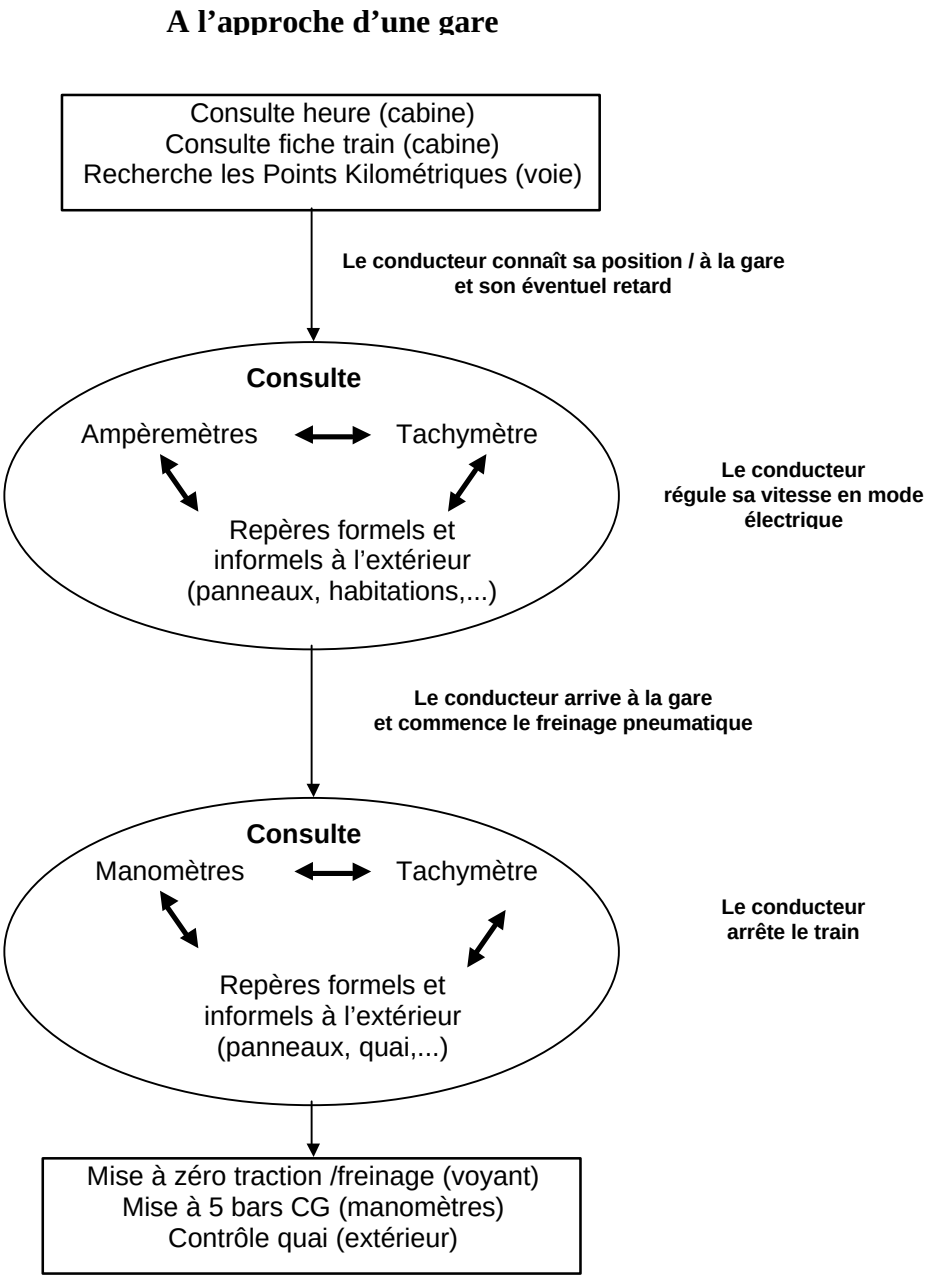


Figure 31 : Exemple de scénario mettant en évidence la prise d'information visuelle

Rappelons que l'analyse fine de l'activité de conduite actuelle a mis en évidence le fait qu'aujourd'hui, les informations visuelles sont très peu structurées au sein du poste de conduite. En effet, au fur et à mesure de la mise en place de nouveaux dispositifs au sein des

postes de conduite, des interfaces se sont juxtaposées sans que l'on puisse réellement prendre en compte la cohérence du système informationnel constitué.

Nous avons donc restructuré les différentes informations selon des zones logiques, liées aux scénarios précédemment identifiés. Les zones informationnelles retenues pour regrouper les informations sont les suivantes :

- la zone de gestion des vitesses limites et des vitesses buts, qui est utilisée pour afficher toutes les informations relatives à la vitesse réelle du train et aux vitesses à respecter (vitesse limite et vitesse but).
- la zone de gestion des distances et des informations ponctuelles, qui est utilisée pour l'affichage des informations utiles à la gestion de la distance et pour l'affichage d'éléments relatifs à la connaissance de ligne (passage à niveau, gares,...),
- la zone d'affichage de l'effort de traction/freinage, qui permet au conducteur de connaître les éléments relatifs aux efforts de traction/freinage demandés, réalisés et réalisables.
- la zone de supervision et de gestion des équipements de sécurité, qui permet d'afficher les informations relatives aux équipements de sécurité.

Ces zones, déterminées lors de discussions avec les conducteurs pourront évoluer en terme de contenu voire être totalement éteintes en fonction du type de ligne, et donc du type de signalisation rencontré.

L'agencement des différentes zones les unes par rapport aux autres, a également fait l'objet de plusieurs propositions. En effet, rappelons que lors de la définition du champ des activités futures souhaitables, des recommandations ont été émises concernant la prise d'informations visuelles : les nouveaux dispositifs mis en place doivent permettre une consultation plus fréquente de l'ensemble des informations données en cabine. Ainsi, plusieurs propositions ont été soumises aux conducteurs, concernant l'agencement des différentes zones les une par rapport aux autres.

Nous avons retenu la disposition Figure 32, qui est la plus en accord avec les séquences de prélèvement de l'information identifiées lors de l'examen des scénarios. En effet, les informations ponctuelles et les changements liés aux distances but doivent être immédiatement

prélevés et figurent donc dans la zone privilégiée en haut à gauche de l'écran. Ces informations demandent généralement un contrôle de la vitesse puis éventuellement une adaptation du niveau d'efforts de traction freinage demandé. La dernière zone d'informations a été donnée sous la forme d'un bandeau en bas de l'écran dans la mesure où les informations qu'elle contient seront consultées lors des fréquents balayages visuels de l'écran.

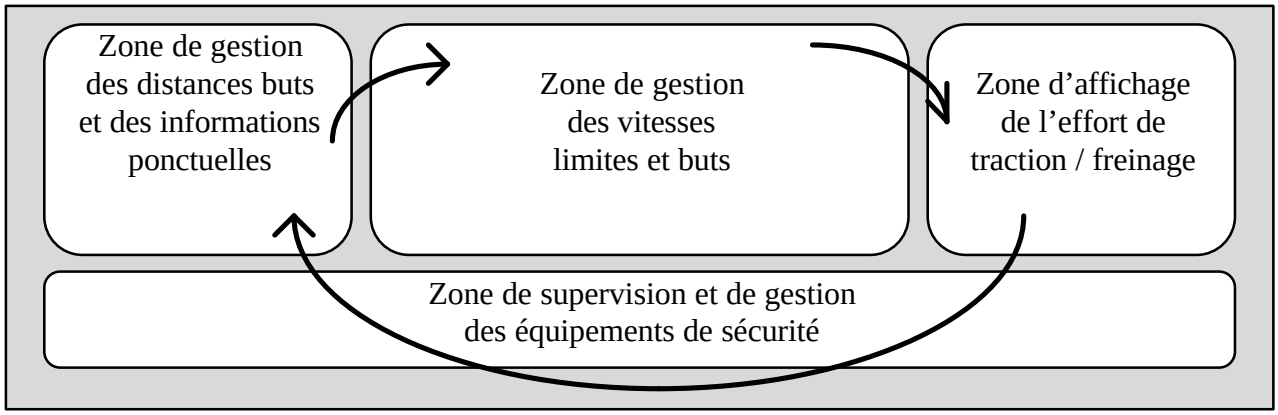

Zone de gestion des distances buts et des informations ponctuelles
Zone de gestion des vitesses limites et buts
Zone d'affichage de l'effort de traction / freinage
Zone de supervision et de gestion des équipements de sécurité

Figure 32 : Répartition des zones informationnelles, pour les interfaces visuelles.

Suite à cette première étape dans la définition du contenu des IHM, nous avons poursuivi nos recherches cette fois-ci sur le contenu des zones informationnelles et sur la manière de présenter l'information. Nous avons ainsi déterminé plusieurs types de solutions en fonction des classes d'informations à présenter (exemples Figure 33).

Pour déterminer les différents principes de solutions, nous nous sommes appuyés sur les dispositifs existants ainsi que sur nos connaissances concernant la manière dont les conducteurs interprètent aujourd'hui les informations qui leur sont données en cabine (BOLLON et coll., 1992). Nous avons également fait référence à différentes recherches ainsi qu'aux normes et standards en vigueur dans le domaine de la présentation de l'information. En effet, comme le souligne CAIL (1986), on trouve de nombreux travaux dans la littérature concernant la définition d'informations visuelles qui concernent :

? *la lisibilité des écrans*. Ces études concernent les cadrans, les échelles, les indicateurs lumineux, d'état ou d'alerte, les compteurs numériques, les écrans d'affichage, les panneaux. Elles ont pour objectif de définir les tailles de caractères selon les distances de lecture, les formes (SANDERSON et coll., 1989 ; CARSWELL, WICKENS, 1987), les couleurs, la luminance (IMBEAU et coll., 1989), les épaisseurs de traits, les temps d'exposition, la dimension et le nombre des divisions des graduations,...,

? *la lisibilité de schéma*, des dessins, des textes (VENDA et coll., 1994 ; UMBERS, 1987 ; TULLIS, 1981) ,...,

? *la position des cadrans et des signaux* les uns par rapport aux autres, afin d'améliorer le temps de réaction de l'opérateur,... (ROTAB et NAQVI, 1995 ; SEIDLER et WICKENS, 1992).

Ainsi, en s'appuyant sur nos connaissances concernant le métier actuel de conducteur et le champ des activités futures souhaitables, nous avons pu définir un grand nombre de principes pouvant être adoptés pour la présentation des informations visuelles et ceci pour chaque type d'informations à présenter (Figure 33).

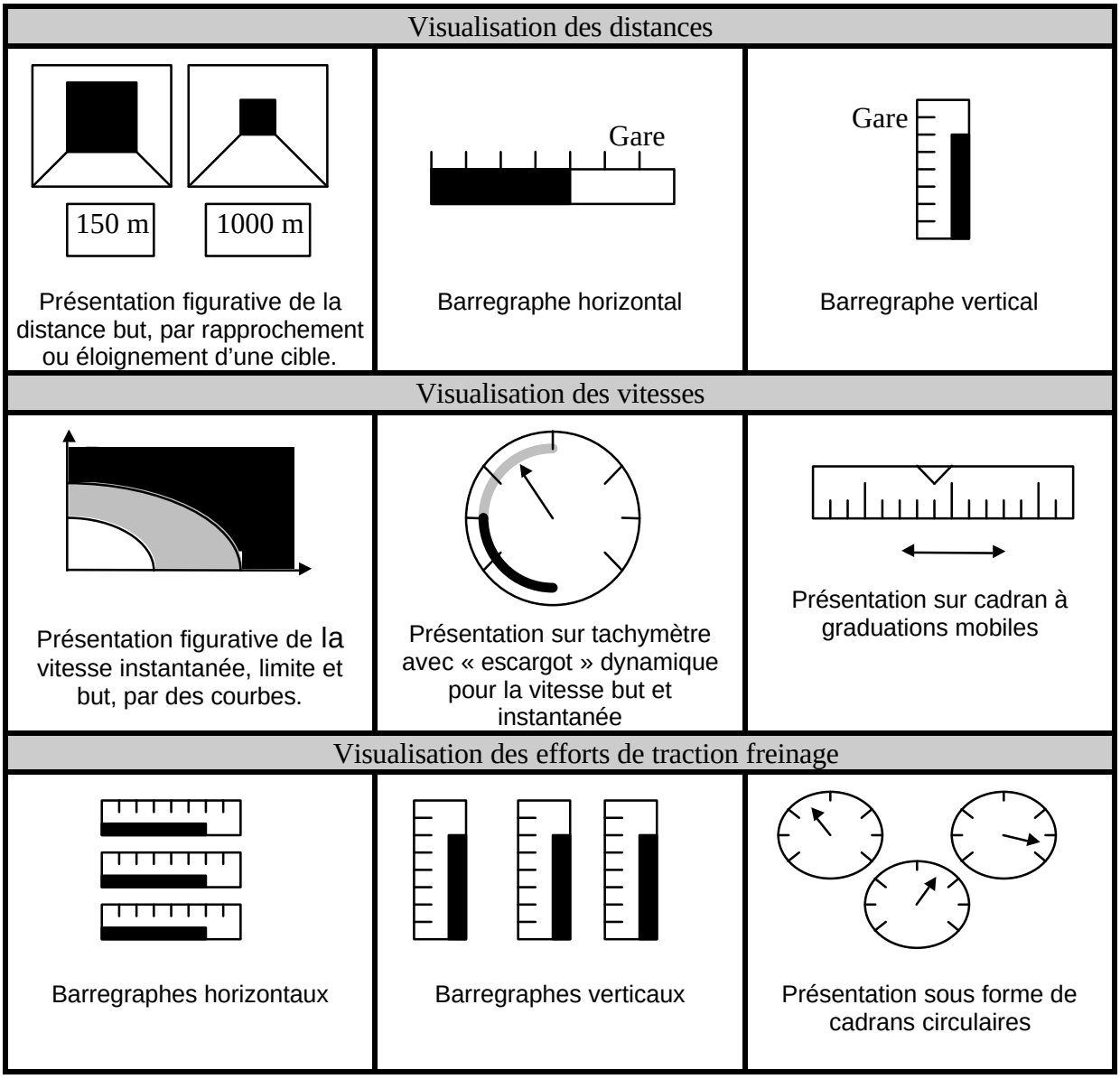

Visualisation des distances
150 m
1000 m
Présentation figurative de la distance but, par rapprochement ou éloignement d'une cible.
Gare
Barregraphe horizontal
Gare
Barregraphe vertical
Visualisation des vitesses
Présentation figurative de la vitesse instantanée, limite et but, par des courbes.
Présentation sur tachymètre avec « escargot » dynamique pour la vitesse but et instantanée
Présentation sur cadran à graduations mobiles
Visualisation des efforts de traction freinage
Barregraphes horizontaux
Barregraphes verticaux
Présentation sous forme de cadrans circulaires

Figure 33 : Exemples de principes pouvant être adoptés pour la présentation des informations visuelles.

Plusieurs principes ont été écartés (ou retenus) par les conducteurs, dans la mesure où l'information telle qu'elle est présentée peut induire (ou limiter) des erreurs d'interprétation. On peut noter par exemple que la représentation figurative de l'indication de vitesse n'a pas été retenue dans la mesure où les variations d'une aiguille permettent plus facilement d'identifier un éventuel patinage en phase de démarrage.

D'autres principes se sont imposés, concernant la gestion des distances buts et des vitesses. En effet, un projet européen en cours de réalisation, doit aboutir à la mise en place d'une norme européenne concernant les interfaces liées à la régulation de la vitesse dans les postes de conduite. Nous nous sommes donc appuyés sur les premiers résultats de ce projet ETCS (European Train Control System), qui tend à uniformiser les principes de solutions à bord des différents engins européens.

3.5.3 Réalisation de la maquette

Un des domaines le plus avancé, au niveau de la simulation en ergonomie, concerne les interfaces logicielles. C'est ainsi que nous avons pu trouver un ensemble d'outils favorisant la mise en place d'expérimentations sur des interfaces visuelles : les outils de prototypage rapide d'interfaces, qui nous ont permis de réaliser la maquette.

A. Le prototypage rapide d'interfaces : VAPS

Le besoin de valider les interfaces visuelles au travers de prototypes est apparu très tôt chez les concepteurs, et a fait l'objet de nombreuses recherches. Les premiers prototypes ont été développés sur la base de programmes informatiques, et très vite est apparu le besoin de mettre en place des systèmes d'aide à la programmation au travers de bibliothèques d'objets composants les interfaces (TAINSH, 1985). Dans les processus continus, l'introduction massive des écrans de visualisation en salle de contrôle pose de nouvelles questions à l'ergonomie. Ce n'est plus la présentation formelle des informations, mais l'adéquation de ces informations avec les exigences de la tâche et l'activité menée qui doit être examinée.

Le prototypage des interfaces doit donc permettre d'évaluer les différentes représentations graphiques, afin de déterminer celle qui aidera le mieux l'opérateur dans le déroulement de son activité (VAN DAELE, 1988 ; KEYSON et PARSONS, 1990). La construction d'interfaces

utilisateur a donc été facilitée par des outils informatiques nouveaux, dont le but est de réduire le fastidieux travail de programmation des interfaces en cours de développement et l'on parle aujourd'hui d'outils de prototypage rapide d'interfaces (KARSENTY, 1991 ; BRADLEY, 1993).

L'utilisation du prototypage rapide d'interfaces permet d'associer l'ergonome à la conception, sans pour autant le transformer en concepteur, soumis aux contraintes de la conception et de la réalisation de l'interface. De plus, et c'est là l'aspect le plus important du prototypage rapide des interfaces, il permet de développer une conception centrée sur l'activité de l'utilisateur (JEFFROY, 1992). On va ainsi essayer d'identifier les difficultés de l'opérateur, identifier les facteurs liés à ces difficultés et rechercher des solutions. Mais on va également s'intéresser aux facteurs d'efficacité, afin de tirer partie de la manière dont l'opérateur construit son activité actuelle et future.

Le prototypage rapide d'interfaces est un moyen efficace et peu coûteux de mettre l'homme dans la boucle de conception (BEEVIS et DENIS, 1992). Il est d'ailleurs principalement utilisé lors des phases de développement de l'interface.

Ces aides logicielles se sont largement développées au cours des 5 dernières années et plusieurs produits sont disponibles sur le marché (Hypercard pour Macintosh, Interface Builder pour le NeXT, Vaps pour les Silicon Graphics et SUN4). C'est le logiciel VAPS que nous avons retenu, puisqu'il peut constituer un système complet de prototypage des composants logiciels et matériels d'une interface, graphique ou non (JURAIN, 1991). Il permet ainsi de construire une interface complète en combinant plusieurs approches :

- la conception détaillée des éléments de l'interface au moyen d'un outil de DAO,
- la définition interactive (sans programmation) des parties mobiles et description de leurs mouvements,
- la liaison de données entre objets par des « broches » typées (connexion par canaux informatiques),
- la construction du fil du dialogue induit par l'interface au moyen de graphes d'états et du formalisme ATN (ce sont divers automates de programmation),
- l'échange de données entre l'interface et l'application par des canaux de communication standards.

De plus, un des points fort de cette application est qu'une fois l'interface réalisée dans l'environnement VAPS, il est possible d'engendrer le prototype opérationnel correspondant sur n'importe quel type de machine. Il s'agit ici réellement de prototypage. Construit dans l'environnement VAPS, l'interface est à l'état de maquette, c'est-à-dire que l'on dispose d'une preuve logicielle de faisabilité, non connectée ou connectée à des stimulateurs de signaux. Une fois intégrée à la machine, elle est connectée aux périphériques réels et à l'application opérationnelle pour constituer un véritable prototype (Figure 34).

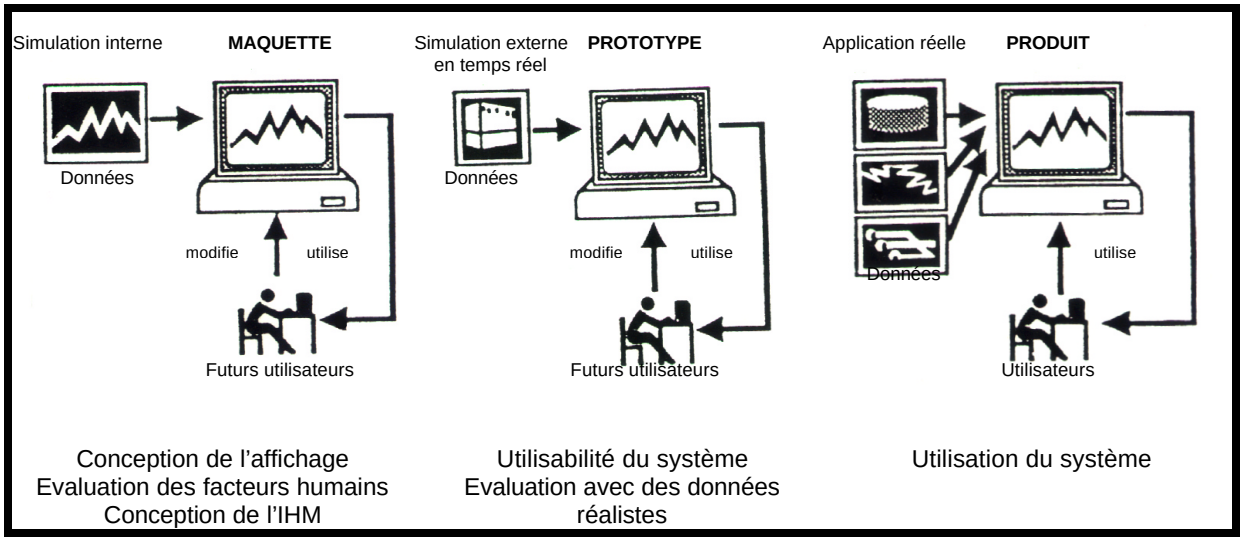


Figure 34 : VAPS, utilisé depuis la spécification du produit, jusqu'à la réalisation du prototype (JURAIN, 1991).

Dans cette phase de définition des préconcept, on utilise VAPS pour la conception de l'affichage, l'évaluation des facteurs humains et la conception de l'IHM. Comme on peut le voir dans l'image de gauche sur la Figure 34, ce sont les futurs utilisateurs qui sont concernés à ce niveau. La simulation interne du logiciel, permet de générer des animations au niveau des interfaces, en relation avec les scénarios qui reproduisent des situations caractéristiques que l'on retrouve en phase de conduite. Les conducteurs, confrontés aux nouvelles interfaces qui évoluent de manière dynamique, tentent d'analyser les situations qui leur sont présentées. Les différentes remarques qu'ils formulent, tant sur la présentation graphique que sur la nouvelle structure de l'interface, donnent lieu à des modifications des interfaces. Ainsi, l'utilisation du prototypage rapide permet de faire évoluer rapidement les maquettes et ainsi de réitérer les évaluations avec les conducteurs.

Nous verrons dans les chapitres suivant comment VAPS a pu être utilisé dans un deuxième temps, pour évaluer l'utilisabilité des interfaces couplées à un système de contrôle commande pilotable de manière interactive par le conducteur (image centrale Figure 34). En effet, nous verrons dans ce chapitre que la simulation externe en temps réel a ici été obtenue par la mise en place d'un simulateur qui reproduit des comportements réalistes de la future rame TGV.

Cette première étape concernant l'évaluation des interfaces, consiste essentiellement à identifier le niveau de détection des informations présentées, ainsi que la compréhension globale des interfaces.

B. Réalisation des préconcepts d'interfaces

A ce stade de l'étude, il s'agit de travailler plus précisément sur les interfaces et d'effectuer un certain nombre de choix en vue d'aboutir à un concept final. Nous avons donc réalisé plusieurs préconcepts d'interfaces, sur la base de la répartition des zones informationnelles définies avec les conducteurs et des différents principes de présentation de l'information possibles. Nous avons ainsi procédé au prototypage rapide des préconcepts d'interfaces à l'aide du logiciel VAPS, afin de les évaluer lors d'expérimentations avec les conducteurs. Deux exemples de préconcepts sont représentés Figure 35 et Figure 36.

La Figure 35, représente un préconcept qui intègre :

- une indication de distance but figurative sous la forme d'un carré (en haut à gauche), qui semble se rapprocher au fur et à mesure que l'on se rapproche du but visé (gare, limitation de vitesse,...)
- un tachymètre classique avec rappel sous forme de digits de la vitesse réalisée (zone centrale). Sur ce tachymètre, on peut voir un bandeau circulaire qui présente la vitesse but et la vitesse but instantanée, qu'il s'agit de respecter en relation avec la distance but.
- une zone liée à la connaissance de ligne, et à l'affichage de défauts (à droite), qui donne un repère spatial de sa position au conducteur.

Les premières confrontations des conducteurs avec cette interface ont fait ressortir que la présence de 2 afficheurs numériques (distance but et vitesse), pouvait prêter à confusion et que la zone de connaissance de ligne est trop chargée, voire difficile à lire dans le cas ou un grand nombre d'informations sont présentes.

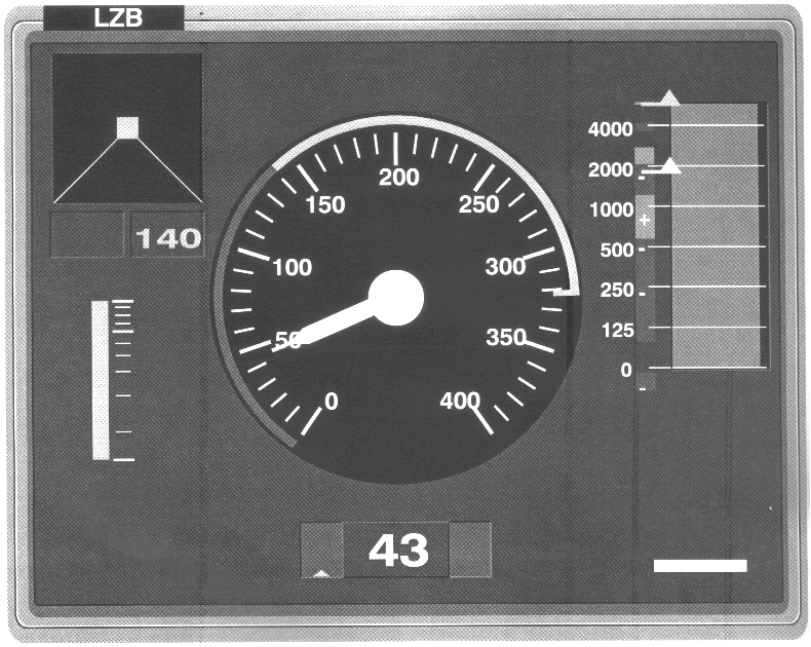


Figure 35 : Préconcept d'interface, avec distance but figurative.

Le deuxième préconcept, Figure 36, a été typiquement inspiré par la définition de la répartition des zones informationnelles précédemment effectuée (Figure 32). Les quatre zones identifiées contiennent :

- pour la zone de gestion des vitesse limites et des vitesses buts (au centre), un tachymètre classique avec un bandeau circulaire indiquant la vitesse but et la vitesse instantanée à respecter pour atteindre la vitesse but au but annoncé (gare, passage à niveau,...).
- pour la zone de gestion des distances et des informations ponctuelles (à gauche) , un barregraphe indiquant la distance but, en lien avec l'indication des informations de connaissance de ligne.
- pour la zone d'affichage de l'effort de traction freinage, deux barragraphes sur lesquels figurent les efforts de traction électriques et pneumatiques demandés et réalisés, ainsi que des pictogrammes spécifiques (arrêt d'urgence, limitation puissance,...).
- pour la zone de supervision et de gestion des équipements de sécurité des pictogrammes liés aux incidents matériels (pannes de moteur, panne d'indication de vitesse,...).

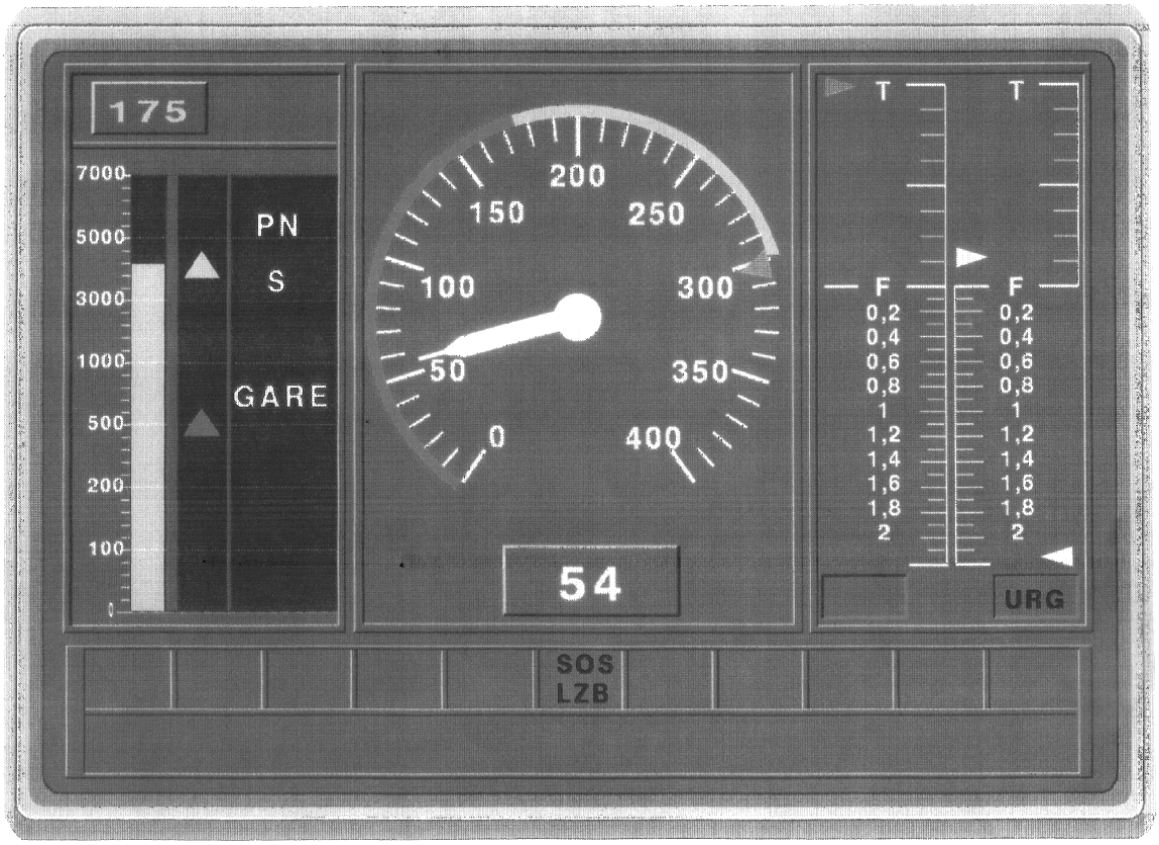


Figure 36 : Préconcept d'interface avec barregraphes pour les niveaux de traction et de freinage.

Ici, les principales remarques des conducteurs concernent les indications d'efforts qui ne sont pas assez précises puisqu'elles ne comportent pas assez de graduations.

3.5.4 Mise en place des expérimentations

A. Objectifs

Pour concevoir une interface adaptée aux utilisateurs, il faut nécessairement passer par une succession de cycles d'évaluation-conception, permettant l'affinement progressif des différents concepts, la sélection du concept final et son évolution (KOLSKI, 1997). L'évaluation a donc pour objectif de vérifier que le système est adapté à la tâche et aux futurs utilisateurs, en permettant:

- l'identification ou la prévision des difficultés rencontrées par les différentes catégories d'utilisateurs,
- la caractérisation des avantages et inconvénients des interfaces évaluées.

B. Méthodes

L'évaluation des préconcepts a été effectuée au travers de :

- la sélection d'un échantillon de conducteurs (ici, les 6 conducteurs du groupe projet),
- l'utilisation du prototypage rapide d'interfaces, et d'une plate-forme de simulation, permettant la représentation dynamique des interfaces,
- l'évaluation itérative des interfaces sur la base d'indicateurs subjectifs.

Nous avons ainsi mis en oeuvre une plate-forme d'évaluation (Figure 37), pour effectuer les évaluations qui ont été menées avec les six conducteurs du groupe projet.

Figure 37 : Plate-forme d'évaluation des interfaces graphiques.

La plate-forme de simulation permet de mettre en situation dynamique les conducteurs, qui en agissant sur une manette, font évoluer les représentations des interfaces. Nous avons ainsi pu reproduire des situations types, évoquées au cours des scénarios (arrêts en gare, séquences de ralentissement, ...) et recueillir les avis des conducteurs au travers de verbalisations spontanées.

Lors d'entretiens dirigés, avec les conducteurs, nous nous sommes attachés à évaluer plusieurs critères (BENCHEKROUN et SAGOT, 1995) qui concernent :

- la compatibilité de l'interface, vis-à-vis du conducteur,

- le groupement/distinction des items, qui prend en compte le positionnement des items les uns/aux autres,
- le groupement/distinction par le format, qui se réfère aux indices graphiques (couleurs, formes,...) qui permet de créer des classes d'informations,
- l'adaptabilité, qui permet au système de réagir différemment en fonction du contexte, des besoins, des préférences,...
- la signification des informations, qui doivent être claires et univoques,
- le guidage, qui conseille, oriente, informe et conduit le conducteur lors de ses interactions avec le système (messages, alarmes,...),
- la redondance, ou rappel des informations qui permet d'améliorer la perception,
- la qualité des messages d'erreurs, qui doivent être pertinents, exacts et significatifs,
- l'apprentissage, qui sera d'autant plus rapide, si les préconcepts sont clairs, univoques, structurés, respectent les stéréotypes,...
- la charge perceptive, qui renvoie à une évaluation de l'ensemble des dispositifs actifs à un instant donné ,
- la densité, qui se définit comme le nombre d'items présentés par rapport à la surface d'affichage,
- .....

Nous avons ainsi pu retenir les principes de présentation de l'information définitifs qui sont pour :

- la zone de gestion des vitesses limites et des vitesses but : un tachymètre radial, avec une représentation dynamique de la vitesse but et de la vitesse instantanée sous forme « d'escargot »,
- la zone de gestion des distances but et des informations ponctuelles : un barregraphe vertical, avec dénominations explicites des événements rencontrés,
- la zone d'affichage de l'effort de traction freinage : des barregraphes dissociés en fonction du type d'effort qu'ils représentent,
- la zone de supervision et de gestion des équipements de sécurité : des icônes.

Dans la mesure où sous ces formes, il est apparu que toutes les informations ne pourraient être contenues sous un même écran, et ceci afin de respecter les tailles des caractères, les critères liés à la densité de l'interface,.... il a été nécessaire de réexaminer la présentation de

l'information. Ainsi, en accord avec le groupe projet, il a été décidé de répartir les informations sur deux écrans qui pour des raisons de fiabilité techniques et donc de sécurité, doivent se rapprocher d'une dimension de 9 pouces.

Le concept finalement retenu concernant la présentation de l'information visuelle, est donc constitué de deux écrans : un premier écran sur lequel figure l'interface que nous avons appelée interface de traction/freinage, et un deuxième écran sur lequel figure l'interface appelée interface vitesse.

C. Concept retenu

L'interface traction freinage

En prenant en compte l'ensemble des recommandations, nous avons pu aboutir à une interface traction/freinage qui se décompose en trois parties distinctes (Figure 22) :

- un premier indicateur gradué de type « barregraphe », indique les variations des efforts électriques de traction et de freinage,
- un deuxième barregraphe représente les évolutions de la pression pour le freinage pneumatique,
- une zone centrale permet par l'intermédiaire d'icônes de donner des informations sur l'état des dispositifs traction/freinage (Blocs Moteurs, Boogies Porteurs, ...), et sur l'enclenchement de la fonction URG, c'est la zone de supervision et de gestion des équipements de sécurité.

Que ce soit pour les efforts pneumatiques ou pour les efforts électriques, on affiche en parallèle la demande du conducteur et ce que réalise la machine. Si un dysfonctionnement engendre une limite de puissance des moteurs (boogie hors service), une butée s'affiche dans la zone représentant ce qui est réalisé par la machine, afin d'indiquer ce qui sera au mieux réalisable. Ainsi, le conducteur est toujours conscient des capacités de la machine et donc des performances techniques qu'il peut obtenir en terme de traction ou de freinage.

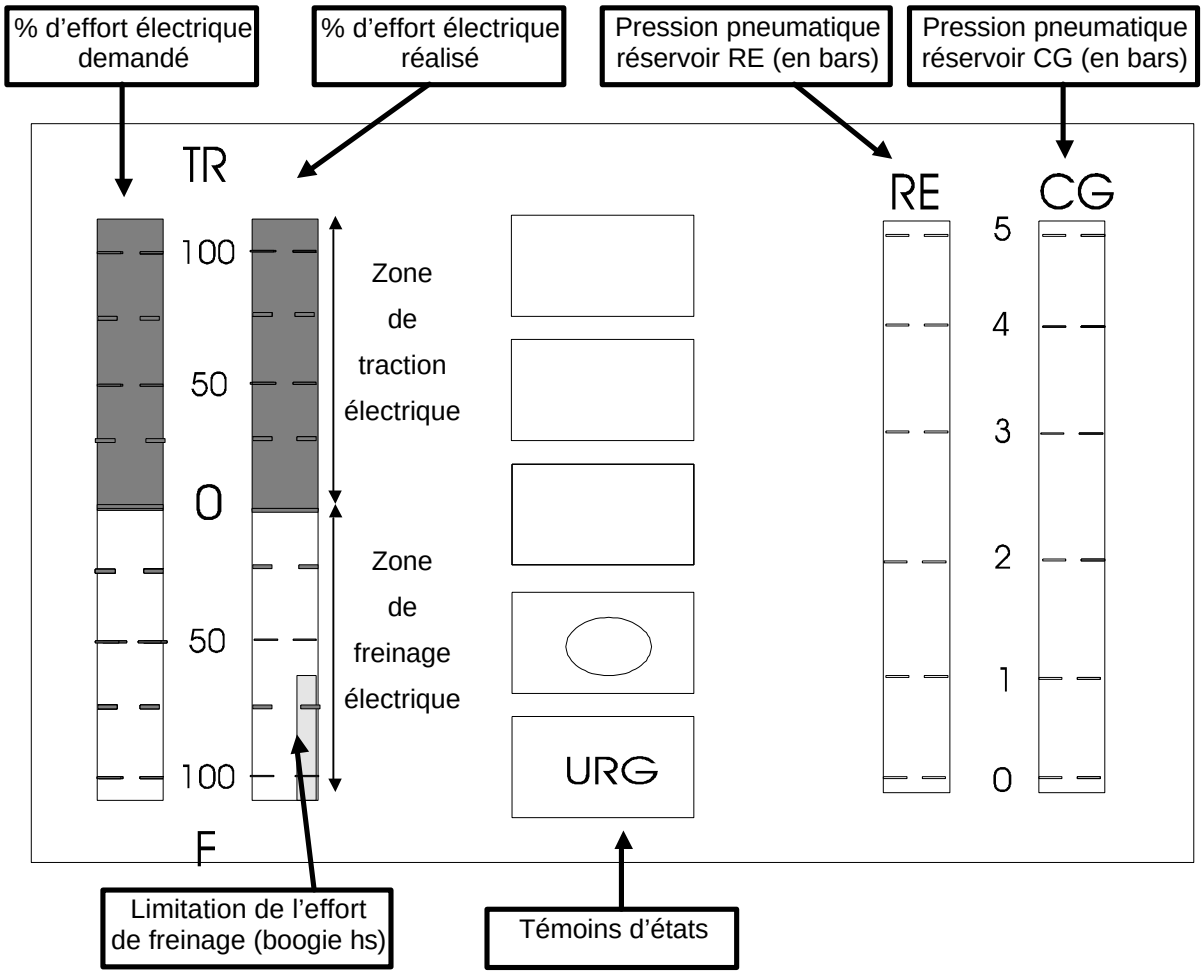


Figure 38 : Schéma de l'interface Traction/Freinage.

L'interface vitesse

L'interface que nous avons appelée interface vitesse, intègre les deux zones précédemment définies : la zone de gestion des distances buts et des informations ponctuelles, ainsi que la zone de gestion des vitesses limites et buts (Figure 39).

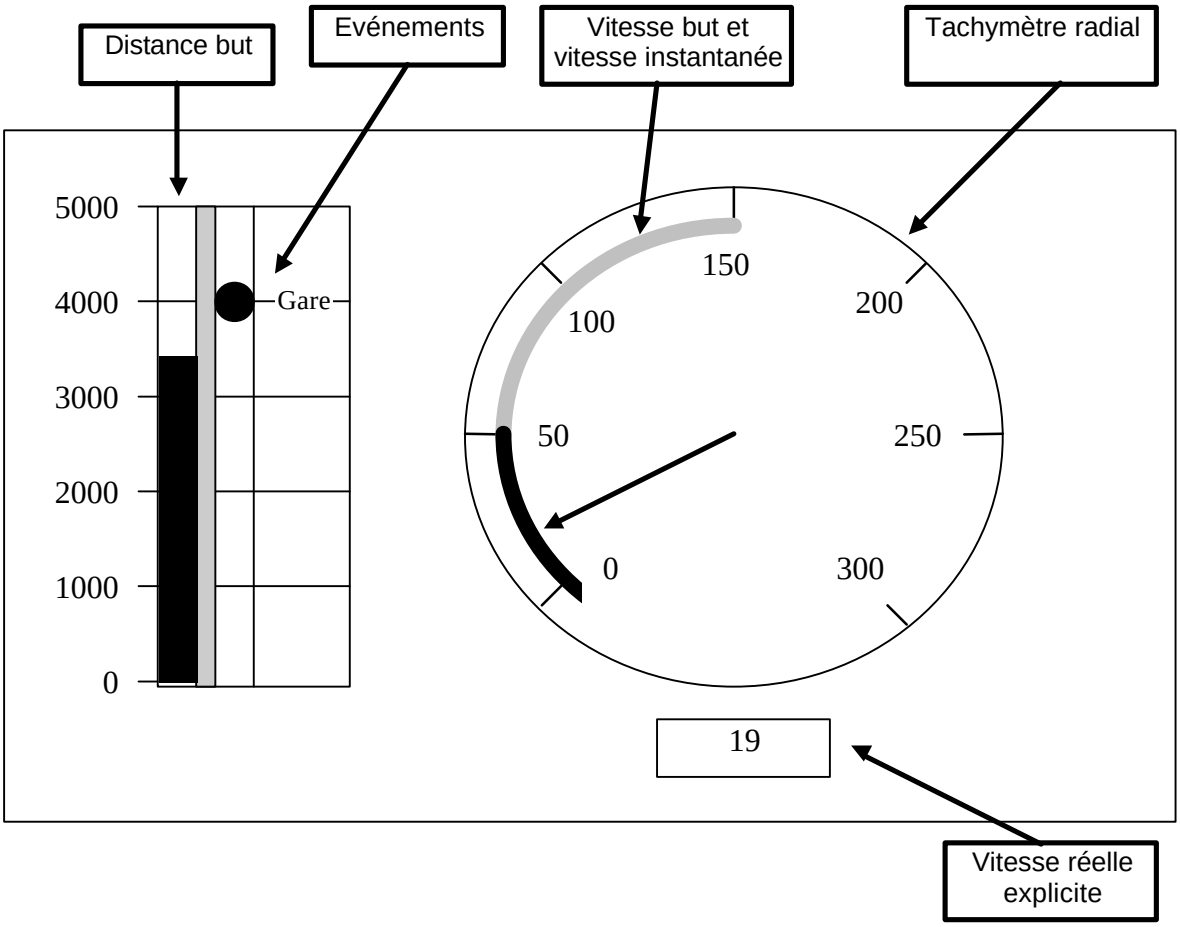


Figure 39 : Schéma de l'interface vitesse.

Ces interfaces ont été validées par le groupe projet, à l'issue des itérations successives menées entre l'optimisation de leur maquette et les évaluations faites par les conducteurs. Ainsi, nous avons eu à disposition les maquettes des interfaces réalisées sous VAPS sous leur forme finale : l'interface vitesse (Figure 40) et l'interface traction freinage (Figure 41).

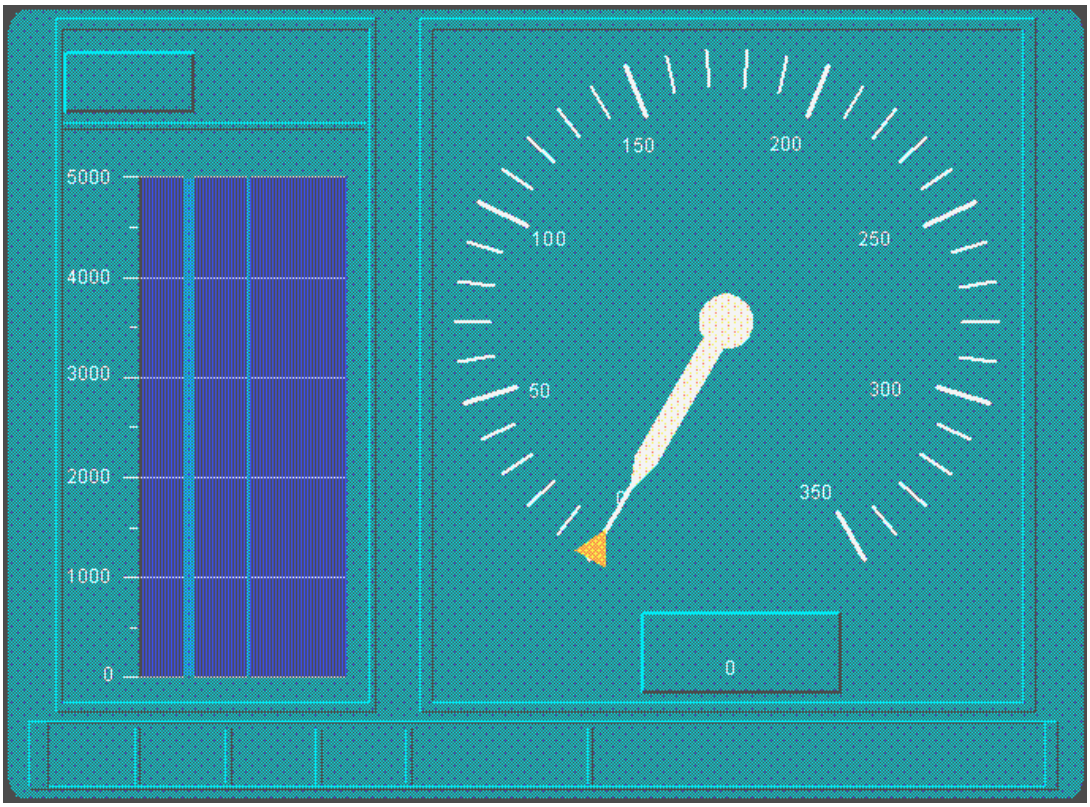


Figure 40:Interface vitesse. Poste de conduite des TGV futurs.

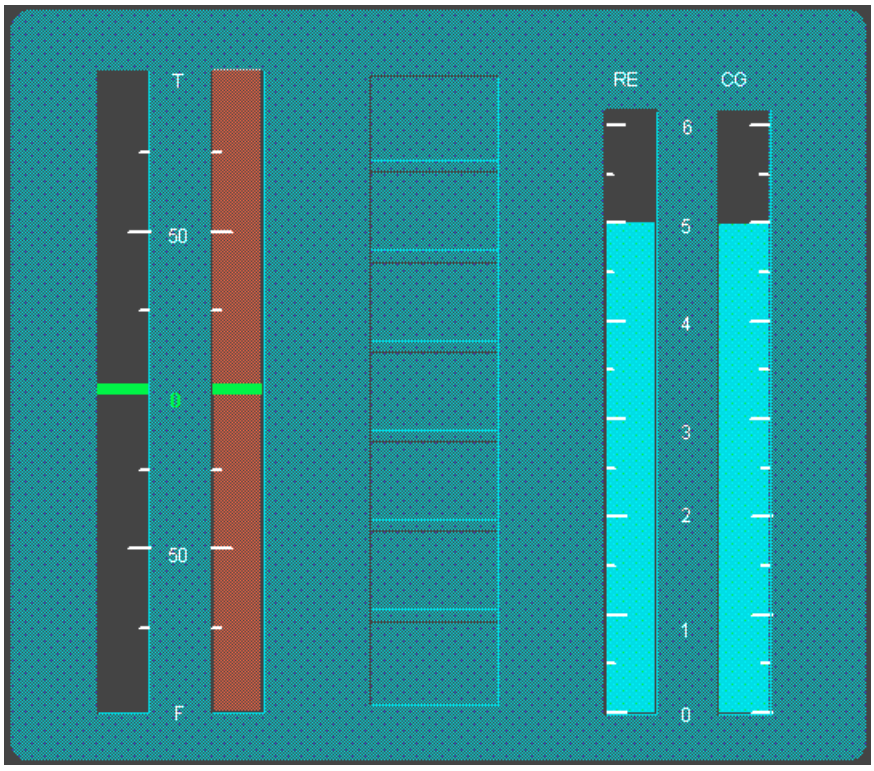


Figure 41:Interface de traction freinage. Poste de conduite des TGV futurs.

Une troisième interface, qui existe sur les TGV actuels, est prévue. Celle-ci est destinée à fournir les informations concernant le SIAC (Système Informatique d'Aide à la Conduite), qui ne sont pas utilisées dans le cadre d'un déroulement classique de parcours. Cette interface fait l'objet d'une étude spécifique par une équipe de la SNCF. Concernant notre étude, nous avons simplement créé une zone d'affichage d'informations complémentaires, afin de pouvoir par la suite tester le principe de conduite avec trois écrans selon la charge attentionnelle et l'organisation de la prise d'information visuelle.

Cette étape nous a donc permis de définir par des cycles itératifs de conception évaluation, les différentes interfaces visuelles liées à la régulation de la vitesse. Comme nous avons pu l'évoquer précédemment, nous avons tenu compte parallèlement à l'étude des différents dispositifs, de leur implantation au sein de la cabine que nous allons détailler dans le paragraphe suivant.

3.6 L'implantation des dispositifs

Optimiser les systèmes d'aide à la conduite, n'est pas une fin en soi. En effet, si l'utilité d'un système est prouvée, qu'il est développé mais mal implanté, il reste difficilement utilisable pour l'opérateur. L'intégration des différents dispositifs sur pupitre est donc une étape très importante, puisqu'elle consiste à déterminer l'accessibilité visuelle et manuelle de ces dispositifs par le conducteur. De la même manière, la détermination de l'emplacement des commandes les unes par rapport aux autres est importante, puisqu'elle va favoriser les temps de réaction et les temps de détection des informations.

3.6.1 Hiérarchisation des besoins et définition d'un principe de solution

Rappelons que notre objectif, lors de la définition des implantations des dispositifs sur pupitre, est d'aboutir à un panel de solutions :

- Ergonomiquement viable, c'est-à-dire tenant compte des typologies des dispositifs (confort, conduite...), de l'importance et de la fréquence d'utilisation, des relations fonctionnelles entre les dispositifs (Manip./ Afficheur).
- Compatible avec les besoins réels des conducteurs.
- Compatible avec la philosophie de l'exploitant (SNCF).

- ? Modulaire et adaptable aux réseaux étrangers.
- ? Compatible avec d'autres utilisateurs (essais, maintenance, CTRA,...).
- ? Intégrant **immédiatement** les contraintes industrielles (normes IUC, encombrements techniques,....).

3.6.2 Les scénarios

Les études envisagées sur les commandes et leur implantation consistent encore trop souvent à remettre en cause les différents dispositifs, sur la base de l'expérience de l'ergonome (GAMST, 1975). Nous avons donc cherché à caractériser les dispositifs existants en définissant leurs principes fonctionnels (voyants lumineux, écrans, boutons-poussoirs bistables,...), puis à hiérarchiser les différentes commandes en fonctions de leur degré d'utilisabilité (localisation, accessibilité compréhension et manipulation) (GOMES et SAGOT, 1996). Nous avons pris en compte leur fréquence d'utilisation, les schèmes d'utilisation, la praticité, le niveau de précision demandé, les efforts requis,... Cette approche a été essentiellement menée sur la base des nombreuses connaissances issues de l'analyse de l'activité et d'une bonne connaissance de l'existant. Pour enrichir ce point de vue, nous avons fait participer les 6 conducteurs du groupe projet à cette étape de mise en place des dispositifs en cabine. Nous avons en premier lieu confronté les conducteurs aux classifications des dispositifs, que nous avions effectuées, puis nous leur avons demandé, en accord avec les travaux d'HEDBERG (1987), de localiser sur un schéma de pupitre les zones préférentielles pour l'emplacement des groupes de commandes et des interfaces visuelles.

Ainsi, chaque conducteur a pu représenter sur un schéma l'implantation qui lui semble la mieux adaptée à l'idée qu'il se fait de son activité future (Figure 43). Au cours des verbalisations menées, sur la base des implantations qu'ils ont définies, ils ont pu justifier les choix qui les ont amenés à ces propositions d'implantation. Dans la plupart des cas, les conducteurs ont justifié leurs choix sur la base de la mise en évidence de séquences d'actions qu'ils auront à mener (Figure 42).

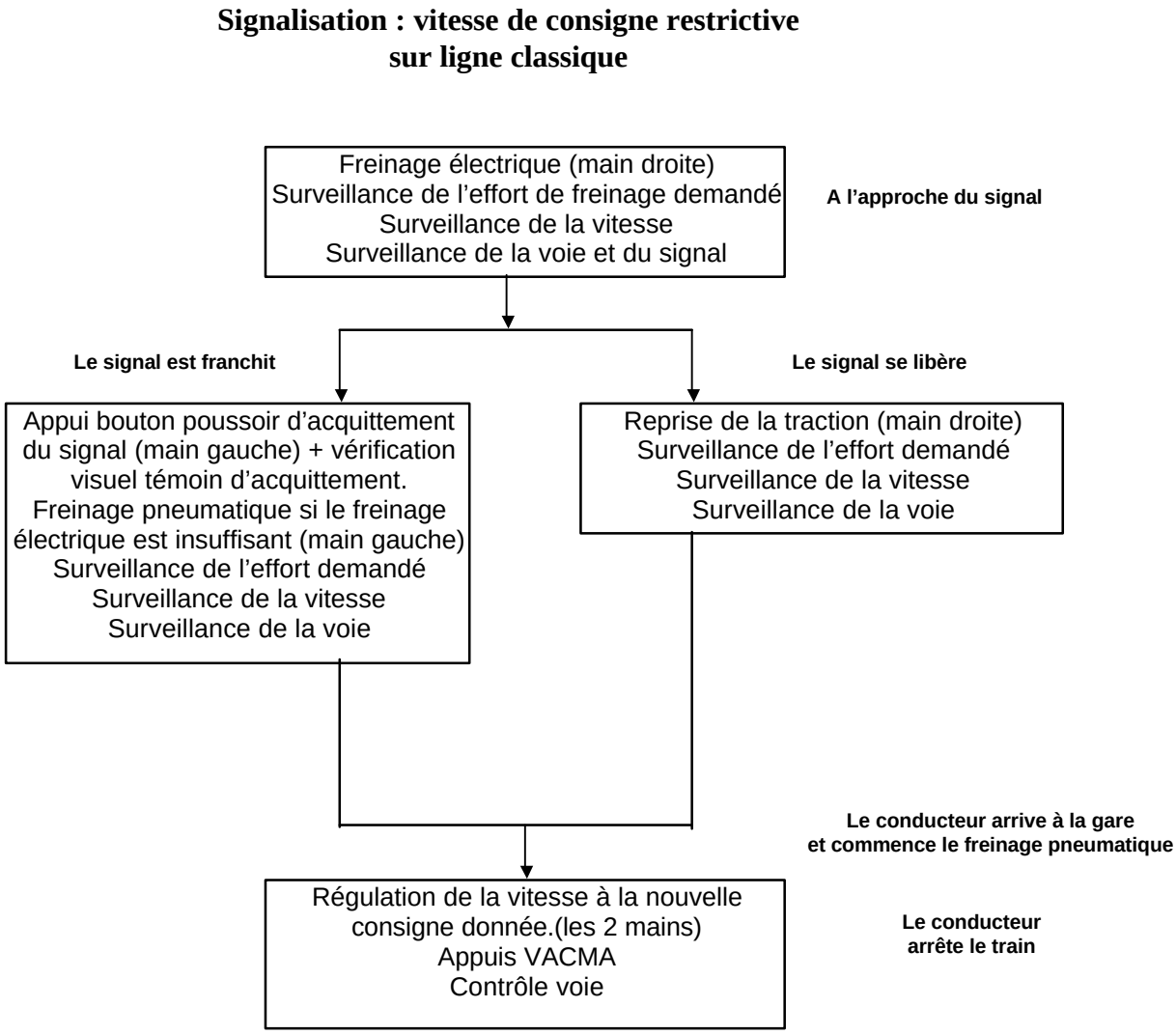

Signalisation : vitesse de consigne restrictive
sur ligne classique
Freinage électrique (main droite)
Surveillance de l'effort de freinage demandé
Surveillance de la vitesse
Surveillance de la voie et du signal
A l'approche du signal
Le signal est franchit
Le signal se libère
Appui bouton poussoir d'acquittement du signal (main gauche) + vérification visuel témoin d'acquittement.
Freinage pneumatique si le freinage électrique est insuffisant (main gauche)
Surveillance de l'effort demandé
Surveillance de la vitesse
Surveillance de la voie
Reprise de la traction (main droite)
Surveillance de l'effort demandé
Surveillance de la vitesse
Surveillance de la voie
Le conducteur arrive à la gare
et commence le freinage pneumatique
Régulation de la vitesse à la nouvelle consigne donnée.(les 2 mains)
Appuis VACMA
Contrôle voie
Le conducteur
arrête le train

Figure 42 : Exemple d'une séquence d'actions à réaliser, pour le respect d'une consigne de vitesse restrictive

Les conducteurs ont été considérés ici comme des co-concepteurs, qui confrontés à une situation inconnue (les nouveaux dispositifs), ont dû innover, en faisant appel à l'ensemble de leurs savoirs (FALZON et TEIGER, 1995). Cette démarche a été pour nous très riche en enseignements, surtout concernant les aspects dynamiques de l'activité de conduite. Progressivement, nous avons ainsi pu identifier, sur la base des séquences d'actions évoquées, tout un ensemble de scénarios liés à l'utilisation des futurs dispositifs.

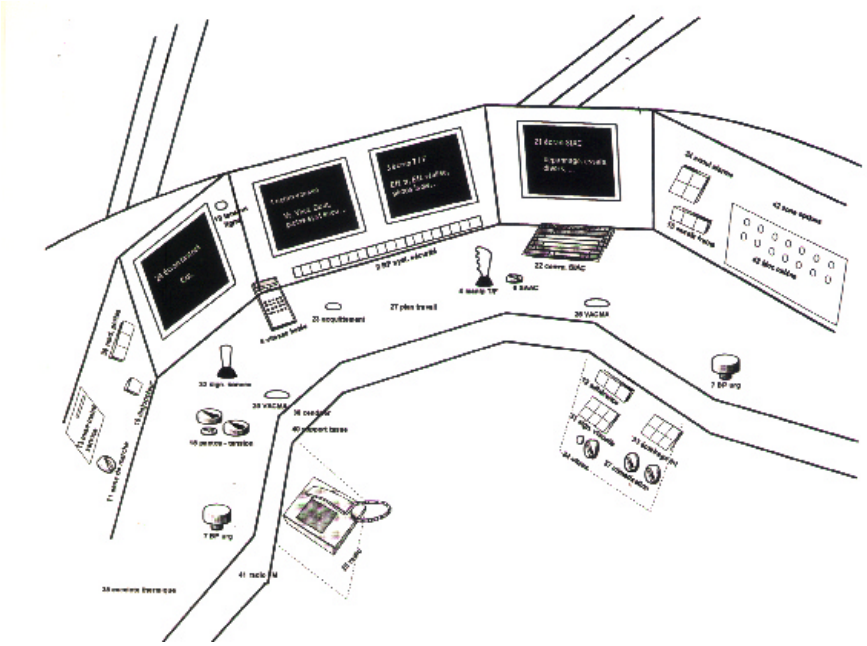


Figure 43 : Définition d'une implantation possible par un des conducteurs.

Nous avons ainsi pu dégager une tendance sur l'ensemble des propositions effectuées par les conducteurs (BENCHEKROUN et coll.,1996) et réaliser une synthèse des implantations retenues (Figure 44) en intégrant des critères pratiques (modularité des pupitres) et techniques (encombrement des parties techniques).

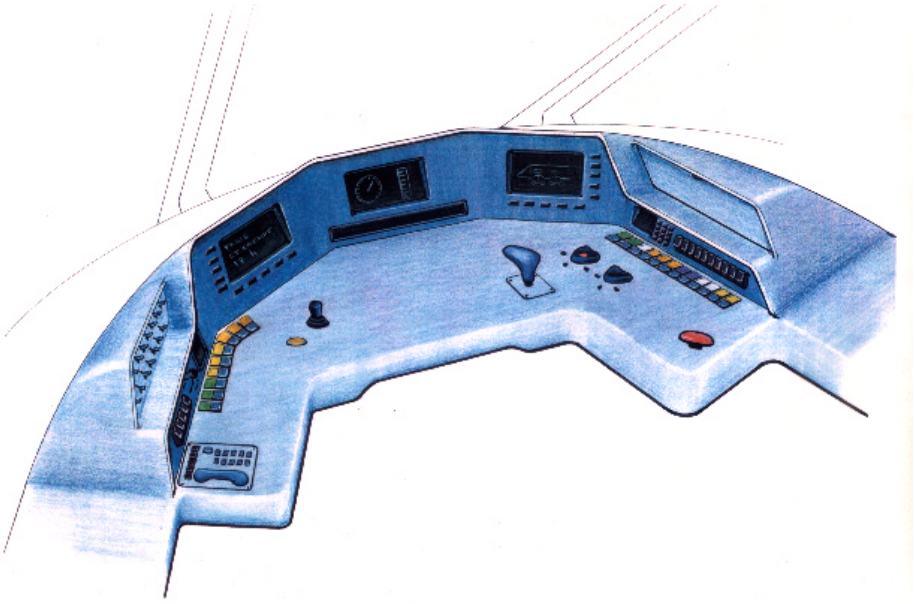


Figure 44 : Implantation finale des dispositifs sur le pupitre.

Sur la base de ces premières recherches, nous avons pu travailler plus précisément sur l'implantation des dispositifs en utilisant des outils CAO ainsi qu'une maquette de pupitre sur laquelle se sont déroulées nos expérimentations.

3.6.3 Réalisation de la maquette

La réalisation de la maquette doit permettre de spécifier les contraintes dimensionnelles (cotes, surfaces, volumes,...) du pupitre et des réglages du siège. Les travaux relatifs à cette étape sont réalisés en CAO 3D, ce qui nous permet de maîtriser l'aspect volumique du poste et d'y insérer les mannequins anthropométriques avec leurs volumes d'atteinte et de confort (Figure 45). Sur la base des plans, nous avons réalisé une maquette à l'échelle 1 du pupitre, afin de pouvoir effectuer une évaluation des dimensions lors d'expérimentations en situation dynamique, sur la base de séquences d'actions types, identifiées lors de la définition des scénarios.

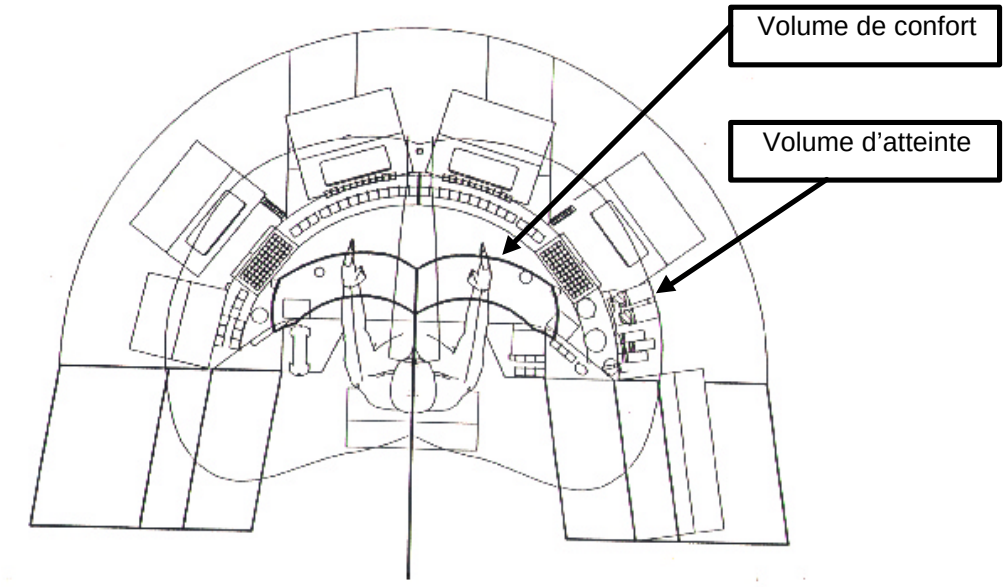


Figure 45 : Section du volume d'atteinte et de confort pour le 5ème centile masculin installé au poste de conduite.

Ici, l'analyse de l'activité de conduite a permis d'orienter la conception. Nous avons alors pu appliquer un grand nombre de normes (GOMES et coll.,1996) qui ont fixé plusieurs dimensions dans le cadre des postes de conduite ferroviaire. On a ainsi utilisé les normes UIC (Union Internationale des Chemins de fer), ainsi que les normes relatives aux données anthropométriques (volumes d'atteinte, de confort, champ de vision) et ceci pour les conducteurs européens futurs.

A l'issue de cette phase, nous avons effectué la validation des dimensions d'un point de vue de la CAO et réalisé une maquette évolutive du pupitre. En effet, la validation CAO, même si elle est nécessaire, n'est pas suffisante, dans la mesure où la variabilité de l'homme ne peut pas être complètement prise en compte par l'utilisation de mannequins. Elle permet par contre, de cibler les plages dans lesquelles les dimensions peuvent encore évoluer, en prenant en compte des critères aussi bien techniques que liés à l'anthropométrie. Ainsi, l'utilisation de la CAO permet de limiter le nombre d'expérimentations à mener sur maquette, en vue de la définition finale de l'implantation retenue.

3.6.4 Mise en place des expérimentations

A. Objectifs

La validation des travaux CAO s'est donc traduite par une maquette d'essais à l'échelle 1, qui nous a permis de valider nos choix. En effet, la CAO est un outil très puissant et très précis, qui fait gagner un temps considérable lors des développements. Mais les modèles anthropométriques en CAO ne permettent pas de tenir compte de toute la variabilité de l'homme. Les différents mannequins utilisés lors de l'étude correspondent à des standards anthropométriques et non à la réalité. Il est donc nécessaire de passer par une étape de validation sur maquette réelle, afin d'affiner les choix effectués.

De plus les évaluations sur maquette, à l'échelle 1, permettent de mettre les sujets en situation dynamique, sur la base des scénarios ou de séquences d'actions types identifiées avec les conducteurs. Ces expérimentations permettent ainsi de valider de manière plus complète l'implantation des commandes.

B. Méthodes

La validation effectuée ici concerne l'interaction pupitre conducteur, d'un point de vue visuel, anthropométrique et subjectif, hors contexte de conduite. L'effectif retenu pour cette validation est un effectif mixte de 15 personnes, qui se veut indicatif, représentant des tailles allant de 1m57 à 1m90 pour les sujets non chaussés (environ 90%de la population). Nous avons choisi ici de ne pas alourdir le protocole, en prenant des sujets non conducteurs de trains. Par contre, les séquences d'actions à réaliser, sont directement issues des scénarios précédemment mis en place avec les conducteurs.

Ainsi, après avoir réglé leur position de siège, les sujets effectuent diverses manipulations de maquettes de commandes, implantées sur le pupitre (Figure 46), en suivant les consignes données par l'expérimentateur. Ils sont également amenés à apprécier la visibilité et la lisibilité d'informations présentées au niveau des futurs écrans.

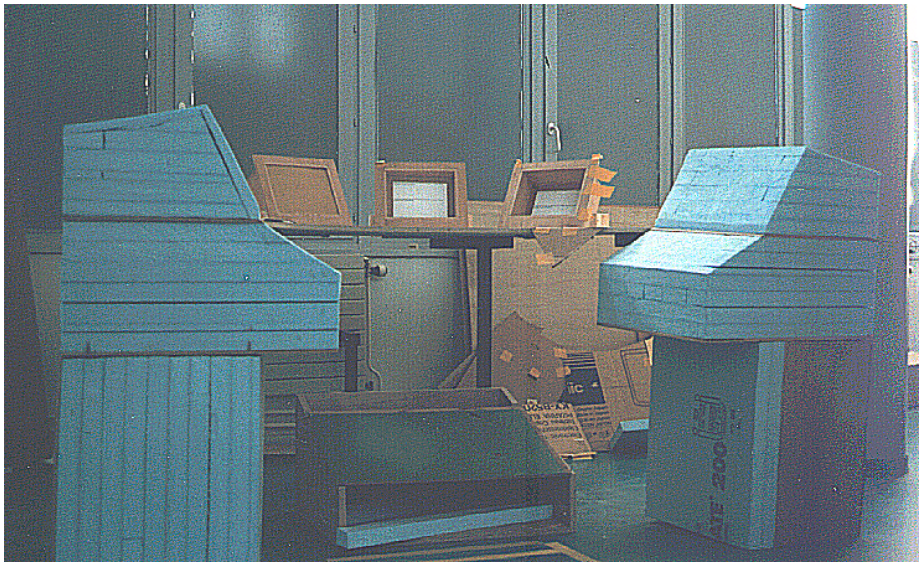


Figure 46 : Maquette de validation des dimensions du pupitre et de l'implantation des commandes.

L'expérimentateur qui indique aux sujets les séquences d'actions à effectuer, relève les difficultés que peut rencontrer le sujet en termes de localisation visuelle, d'accessibilité et de manipulation des commandes. Au cours de l'essai, le sujet est amené à exprimer les difficultés qu'il rencontre.

C. Plans CAO de l'implantation retenue

Suite aux expérimentations, nous avons réalisé divers aménagements concernant le positionnement des commandes. Nous avons ainsi pu passer à la réalisation des plans de l'implantation finalement retenue et validée lors d'une réunion avec le groupe projet.. Ces plans et schémas traduisent essentiellement ici les aspects dimensionnels du pupitre, dans la mesure où un groupe de consultants en design est amené à réaliser le modèle de pupitre final qui intégrera des formes définitives, des couleurs, différentes textures,...

Un autre aspect de l'étude lié à la définition du concept lié à la régulation de la vitesse a concerné les informations sonores en cabine de conduite. En effet, la mise en place d'écrans au niveau de poste de conduite va influencer la charge visuelle des ADC. Il a donc été question de mettre en place de nouvelles informations sonores en cabine pour limiter cette charge visuelle

et améliorer la détection des informations. En effet, c'est en examinant dès maintenant l'ensemble des systèmes informationnels, et donc en développant parallèlement les interfaces sonores, que l'on peut aboutir à une solution cohérente acceptable en termes d'interfaces pour l'agent de conduite.

3.7 Les informations sonores en cabine

L'agent de conduite, au cours de son activité, est amené à détecter des signaux ou des alarmes, à traiter les informations qui leur sont associées et à agir en fonction des besoins soulevés. Il s'agit donc pour le concepteur de trouver la meilleure association signal/tâche à réaliser, afin de rendre performant le système homme/machine dans les configurations de fonctionnement normal ou de dysfonctionnements. Dans cette partie, nous décrirons plus particulièrement comment s'est effectuée la conception et l'évaluation des informations sonores en cabine, liées à la régulation de la vitesse. Rappelons que l'analyse de l'activité actuelle a montré concernant les informations sonores en cabine (ZWOLINSKI et SAGOT, 1996), qu'il existe 23 informations sonores, ce qui est trop important en terme de mémorisation, que les fréquences et niveaux sonores de ces informations sonores sont inadaptés au bruit de fond de la cabine, et qu'il n'existe pas de hiérarchisation des alarmes permettant d'établir des priorités lors d'un déclenchement multiple des alarmes.

3.7.1 Hiérarchisation des besoins et définition d'un principe de solution

L'étude de chacune des informations sonores a permis de lister un ensemble de critères au travers du cahier des charges, orientant ainsi les solutions. De manière générale, on a cherché à rendre plus compréhensible le système informationnel sonore en prenant comme principe de solutions :

- Des alarmes sonores, pour tout ce qui concerne les informations nécessitant une action immédiate.
- Des informations vocales ou musicales, pour l'ensemble des informations devant être mémorisées ou ne nécessitant pas une action immédiate.
- Un regroupement sous un même signal sonore, des informations impliquant des actions du même type (exemple de l'arrêt immédiat lors d'un départ en gare, provoqué par un voyageur ou par le contrôleur : alarme voyageur/faux départ).

Suite aux premières réunions de travail concernant les informations sonores, il a été décidé de les regrouper en quatre catégories :

1. Les informations sonores liées à des indications.
2. Les informations sonores liées aux changements de consignes de conduite.
3. Les informations sonores liées au non-respect d’une consigne.
4. Les informations sonores indiquant un danger ou un accident.

3.7.2 Les scénarios

La Figure 47, permet de visualiser l’ensemble des paramètres qui interviennent suite au déclenchement d’un signal sonore. Ce schéma général a été construit suite à l’identification avec les conducteurs, de l’ensemble des scénarios pouvant se dérouler suite au déclenchement actuel d'une information sonore en cabine. On montre ainsi dans quelle mesure le signal sonore peut être pris en compte ou non, de quelle manière, et quelles seront les implications possibles liées à sa non prise en compte.

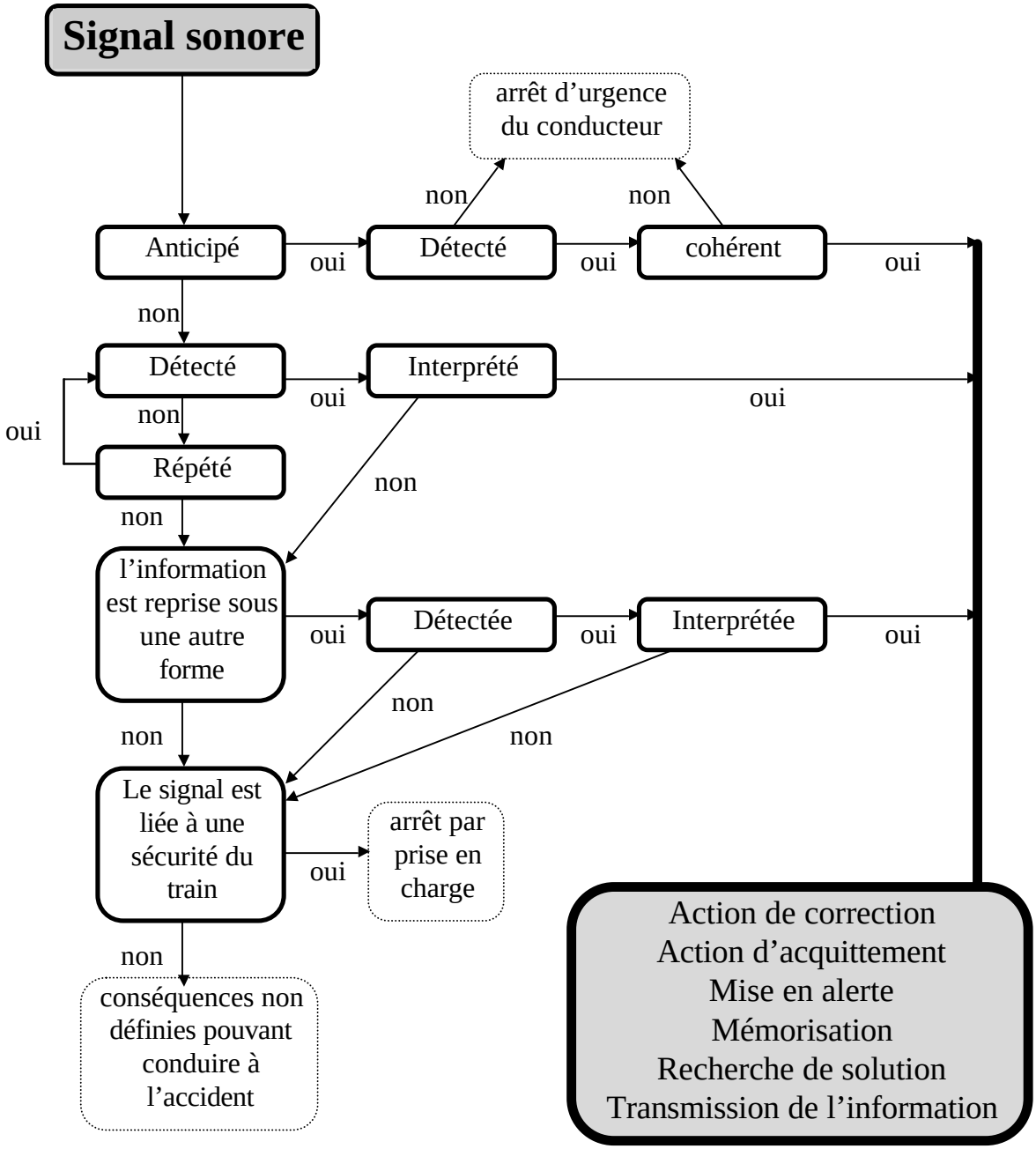


Figure 47 : Scénario général lié l'apparition d'une information sonore en cabine de conduite.

Nous nous sommes ainsi attachés à déterminer l'utilité de chaque alarme, à favoriser sa détection en fonction de l'action qu'elle doit engendrer, et à la rendre compatible avec l'ensemble du système informationnel existant.

3.7.3 Réalisation de préconcepts

Les recommandations concernant la conception des sons demeurent très limitées dans les ouvrages classiques d'ergonomie. Seuls quelques principes généraux sont présentés : limites de niveau sonore, principe du masquage des sons par rapport au bruit de fond,... (PARSONS, 1995). Un document fait cependant référence dans le domaine de la conception des sons, c'est le Guide pour la conception et/ou l'évaluation d'alarmes sonores utilisé dans les postes de pilotage des avions commerciaux (PATTERSON, 1983). Dans ce guide, 4 aspects sont examinés pour la conception d'un son : le niveau sonore global - les caractéristiques temporelles que devra avoir le son - ses caractéristiques spectrales - et l'ergonomie. C'est suivant ces quatre points que nous nous sommes attachés à rédiger le cahier des charges pour chacun des sons.

Mais l'ensemble des critères entrant dans la conception de chacun des sons, ne peuvent pas tous être fixés sur la base de recommandations ergonomiques ou acoustiques. En effet, une fois les différents critères du cahier des charges respectés, de nombreuses solutions restent envisageables du fait de la large plage de fréquences disponibles ou des nombreuses possibilités de cadence son/silence qui différencient les alarmes. Les fréquences sonores, par exemple, n'influencent le temps de réaction qu'au-dessus de 100 dB (BROADBENT, 1957). On a donc choisi pour chacune des informations sonores, de définir plusieurs sons sur la base des cahiers des charges, en modulant les critères encore non fixés. Afin de pouvoir générer de nouvelles alarmes, nous avons ainsi synthétisé des sons à différentes fréquences, à partir d'un générateur de signaux carrés. Ces signaux comportent tous plusieurs harmoniques, comme le préconisent les normes internationales, afin d'éviter les effets de masquage (PATTERSON, 1990). Ces séquences ont des fréquences dominantes de 340, 400, 425, 440, 500, 554, 750, 900, 1000, 1100, 1260, 1400, 1520, 1800, 2000, 2500, 3000, 3250 Hz. L'association de ces sons à l'aide d'un logiciel informatique de traitement de séquences permet alors de générer de nombreuses alarmes en jouant sur les paramètres décrits ci-dessus. D'autres sons ont été proposés sur la base d'enregistrements numériques d'alarmes existantes de type buzzer, timbres ou sonneries.

3.7.4 Mise en place des expérimentations

A. Objectifs

En accord avec le groupe projet, nous avons choisi de mettre en place des expérimentations afin de pouvoir évaluer les informations sonores futures au fur et à mesure de leur conception. En effet, lors de la conception d'une information sonore, il faut pouvoir cibler les différentes variables relatives aux sons, en relation avec l'activité qui sera menée et donc en prenant en compte les connaissances actuelles des conducteurs.

Il s'agissait donc de réaliser un banc d'essais qui permet de présenter les différents préconcepts de sons aux conducteurs au fur et à mesure de leur définition. Ce banc d'essais permet de valider ou non l'adéquation du niveau sonore des signaux avec le bruit environnant (ANTIN et coll., 1991) ou de valider de manière plus générale la détectabilité des signaux (FIDELL, 1978).

B. Méthodes

Afin d'évaluer les alarmes dans un contexte proche de la réalité, nous avons en premier lieu recréé une ambiance sonore proche de celle d'une cabine de conduite TGV actuelle. Nous avons ainsi été amenés à développer un banc d'essai pour les sons en cabine de conduite TGV.

(i) Le banc d'essais

Nous avons reproduit le bruit de fond d'une cabine de conduite de TGV, sur lequel il nous est possible de jouer plusieurs jeux d'alarmes ou de messages vocaux en vue de leur validation.

Prise en compte de l'ambiance sonore en cabine TGV.

Le rapport final d'étude de Juillet 1993, concernant le projet « conception ergonomique du poste de conduite du TGV nouvelle génération » portant sur l'étude des facteurs de charge (SAGOT et coll., 1993), a permis de prendre en compte les caractéristiques physiques du bruit de fond obtenu dans les cabines de TGV existants. C'est sur la base de ces éléments qu'il nous a été possible de recréer l'ambiance sonore de la cabine, en laboratoire.

Les mesures effectuées au cours des trajets ont montré qu'il existe quatre catégories de bruits :

- les bruits de roulement,

- les bruits aérodynamiques,
- les bruits des moteurs de traction.
- les bruits des équipements auxiliaires (électronique de puissance, compresseurs, refroidissements des armoires électriques), qui ont été négligés du fait de leur faible niveau.

Dispositifs mis en place pour la reproduction de l'ambiance sonore

Les dispositifs mis en place sont :

* Un PC DX 2/50 (appelé PC sons) avec une carte son GRAVIS ULTRASOUND Max., qui gère les niveaux sonores des trois bruits qui composent le bruit de fond, ainsi que le déclenchement des alarmes.
* Une table de mixage EXPELEC MIX 003, qui nous permet de régler aisément les niveaux sonores des alarmes par rapport au bruit de fond.
? Un amplificateur MARANTZ PM-43, relié à un jeu de 2 enceintes JPW pour le bruit de fond et à une enceinte pour les alarmes.

On donne en continu au PC sons des informations de vitesse, de traction ainsi que des événements liés au son, afin de reproduire une séquence souhaitée. Les différents bruits qui composent le bruit de fond ont été sélectionnés sur des enregistrements numériques effectués en cabine lors de trajets réels. Ces séquences de sons sont jouées à différentes intensités et à différentes fréquences, en fonction du niveau de traction et de la vitesse simulée du train. Les signaux évoluent ainsi suivant les lois présentées sur la Figure 48.

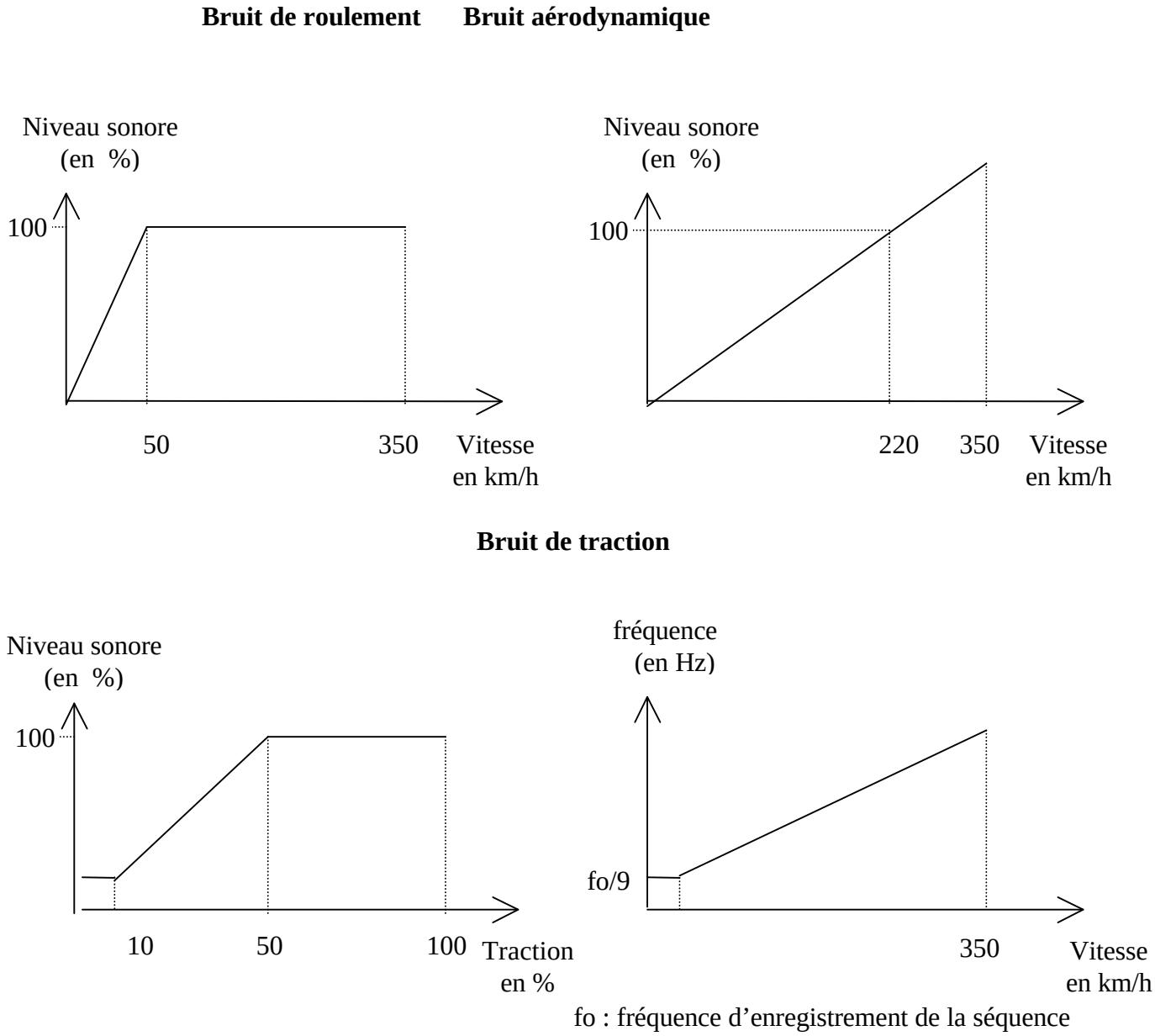


Figure 48 : Lois d'évolution des sons qui constituent le bruit de fond simulé au sein de la cabine de conduite des TGV.

(ii) Le déroulement

A ce niveau de l'étude, le groupe projet a pu être enrichi de 6 autres conducteurs de trains non conducteurs de TGV. Ainsi, nous avons pu proposer à 12 agents de conduite une écoute hors contexte de conduite des préconcepts concernant les classes d'alarmes mises en évidence. Les propositions peuvent être vocales ou sonores et leur écoute s'effectue sur le bruit environnant simulé de la cabine. Les conducteurs ont alors à effectuer un choix parmi les préconcepts proposés pour chaque alarme, tout en se référant aux critères de détection, de compréhension et d'utilité auparavant définis.

C. Les résultats

Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, nous avons été amenés à réaliser, pour chaque information sonore, une proposition de préconcepts sous forme de son ou de message vocal (Tableau 3). Pour les propositions sonores, nous avons indiqué les fréquences des sons qui interviennent dans l'alarme ainsi que la cadence du son. Exemple : l'alerte radio 1 est une alerte composée de la succession de 2 sons : un son de 554 Hz joué pendant 0.1s puis un son de 440 Hz, joué 0.4s. Pour chaque proposition sonore, nous avons fait figurer le rang moyen et son écart type attribué dans le cas ou plus de 3 propositions étaient faites, et une * pour les propositions retenues majoritairement par les conducteurs dans les autres cas. Enfin, nous avons fait ressortir en caractères gras, le préconcept retenu pour chacune des catégories, puis nous avons fait figurer le classement final, en éliminant les solutions définitivement rejetées.

Alarmes concernées	Proposition sonore	Note obtenue	Proposition vocale	classement global
Alerte radio	***1.* 554 Hz/440 Hz à 0.1/0.4** *2.* 3250 Hz/2500 Hz à 0.1/0.4 *3.* 1800 Hz/1400 Hz à 0.1/0.5 *4.* 3000 Hz/500 Hz à 0.1/0.1	1,8 (?1,1) 2,5 (?1,1) 3,3 (?0,6) 2.4 (?1,2)	Urgence Arrêt d'urgence **Alerte radio**	Signal sonore *(1-4-2-3)*
Alerte dépassement vitesse	*1.* **2500 Hz 0.15 à ON/0.1 OFF** *2.* 1000 Hz à 0.1 ON/0.05 OFF *3.* 3250 Hz/2500 Hz à 0.1/0.4 *4.* 3000 Hz à 0.1 ON/ 0.1 OFF *5.* 1400 Hz à 0.05 ON/0.1 OFF	1,8 (?1,4) 2,8 (?1,3) 3,6 (?1,3) 3,3 (?1,5) 3,5 (?0,9)	Vitesse **Attention vitesse** Vitesse dépassée	Signal sonore *(1-2-4-5-3)*
Alarme voyageur	*1.* **5* 1000 Hz 0.25ON/0.75 OFF** *2.* 3000 Hz à 0.1 ON/0.2 OFF *3.* 2000 Hz/1520Hz 0.6 ON/0.2 OFF *4.* 2000Hz/1520Hz à 0.2/0.6 *5.* 900Hz/500Hz à 0.5/0.5	2,3 (?1,8) 3,5 (?1,4) 2,8 (?1,3) 3,2 (?1,1) 3,3 (?1,2)	**Alarme voyageur**	Vocal *(1-3-4-5-2)*
Bip de répétition des signaux Signal en RSO	500/**1000**/**1520**/2000/2500/3000	*	------	Bip *(2-3)*
Son RA / Son VA	***1.* RA SNCB 3000 Hz** *2.* RA son sourd *3.* sonnerie 1(type réveil) *4.* sonnerie 2 (type passage à niveau) ***5.* sonnerie 3 (type téléphone)**	* *	Vacma Relâchement / appui RA / CA	Signal sonore (1 et 5)
Panne sol / Panne engin	Alarme spécifique **Bip d'attention**	*****	**Panne sol** **Panne engin**	Vocal
Effacement du « b » KVB	Alarme spécifique **Bip d'attention**	*	Vitesse limitée à 220 Entrée en zone 160 / 220	Bip
Autorisation de départ	Ding ding aigu Ding ding grave Ding ding intermédiaire		Départ / arrêt **Départ / stop** Départ / halte	Vocal
Appel d'attention radio et interphonie	**Son musical** Bip d'attention	*****	**Appel de 'X'**	Sonore ou vocal

Tableau 3 : Synthèse de l'évaluation de pré-propositions d'alarmes futures.

Des propositions, telles que la combinaison d'un message vocal à une information sonore, ont été retenues. Il s'agit donc par la suite de déterminer la pertinence de ces nouveaux modes de présentation des informations et de valider les futures propositions, en accord avec les travaux effectués par la littérature. Il faudra s'attacher par exemple à optimiser le mode de présentation des informations données en vocale par des signaux de pré annonce (SIMPSON et WILLIAMS, 1980 ; HAKKINEN et WILLIGES, 1984), à réaliser des essais de différents synthétiseurs de messages en vocal, pour mesurer l'impact de la qualité de la voix et la difficulté de compréhension de messages longs (PARIS et coll., 1995) et chercher à combiner différents modes de présentation de l'information dans l'objectif d'améliorer la détection et la compréhension de l'information (SORKIN et coll., 1988 ; SPERANDIO et DESSAIGNE, 1988 ; WOGALTER et YOUNG, 1991).

On ne peut en effet, malheureusement pas généraliser les résultats des différents travaux déjà effectués dans le domaine, dans la mesure où une trop grande variété de sons a été examinée et que les mesures des performances liées à l'étude de ces sons sont très diversifiées (KOELEGA et BRINKMAN, 1986). Nous avons donc choisi de continuer nos expérimentations et de valider les choix effectués en relation avec l'activité réalisée par les conducteurs, en replaçant l'écoute des alarmes dans le cadre d'une situation de conduite simulée dont la mise en place fait l'objet du prochain chapitre.

3.8 Discussion générale sur l'utilisation de la simulation en phase de définition et d'évaluation des préconcepts

La définition et l'évaluation des préconcepts menées lors des études préliminaires, est essentielle dans le processus de conception. C'est la phase ou le groupe projet envisage un grand nombre de solutions concernant les dispositifs à concevoir afin d'effectuer la plupart des choix concernant les aspects opérationnels, fonctionnels et techniques, du futur produit. Ici, de nombreux compromis sont à établir au sein du groupe projet, compromis qu'il est ensuite difficile de remettre en question. En effet, une remise en question des orientations choisie lors de cette étape de définition des préconcepts engendrerait des coûts supplémentaires et un allongement des délais non négligeable lors des étapes suivantes du processus de conception. Il est donc essentiel de faire fédérer l'ensemble des acteurs du projet au cours de cette étape.

Mais dans le cadre de la conception d'un produit tel que le poste de conduite TGV, les compromis sont d'autant plus difficiles à établir, que le système étudié est complexe, et que l'on ne peut pas avoir de certitude concernant l'utilisation future des préconcepts proposés. Le système global étudié, lié à la régulation de la vitesse est rendu rapidement instable dès qu'une modification est apportée à l'un des éléments qui le compose. Ainsi, dans la mesure où il est difficile à ce niveau de l'étude, d'avoir une vision globale de la solution finale et de son niveau d'acceptabilité en terme d'adéquation avec la tâche future à effectuer, nous avons choisi, dans une certaine mesure, de découper le système en différents sous systèmes. Cette étude parcellaire des préconcepts liés à la régulation de la vitesse, correspond à une méthode de recherche allant dans une certaine mesure à l'encontre de l'approche systémique qu'il convient de mener lors de l'étude des systèmes complexes. Mais cette approche a permis de construire rapidement des situations dynamiques paramétrables en laboratoire afin d'effectuer des expérimentations sur les préconcepts des dispositifs qui composeront le concept global lié à la régulation de la vitesse. Nous avons ainsi pu manipuler en laboratoire des caractéristiques générales de situations dynamiques, dans un contexte simplifié (HOC, 1996) afin d'apporter des premières réponses concernant l'utilisation future des dispositifs, dès la phase de définition des préconcepts.

Soulignons que la cohérence du concept global lié à la régulation de la vitesse n'a pas été oubliée lors de cette étape. En effet, la cohérence entre les différents sous systèmes étudiés a

été prise en compte de manière théorique, dans la mesure où le groupe projet a pu continuellement faire référence à la définition du champ des activités futures souhaitables établie lors des études préliminaires.

Ainsi, notre démarche basée sur la simulation de l'activité a permis d'aider le groupe projet à réduire le champ des « futurs possibles » d'un point de vue de la technique, de l'activité,..., lors de cette étape du processus de conception. Nous avons ainsi pu valider le passage aux études détaillées, étape suivante du processus de conception, sans risquer de devoir revenir sur les compromis effectués.

La démarche de simulation mise en place, a permis de construire en quelque sorte un cadre de référence commun à l'ensemble des acteurs du projet, qui s'appuie sur la mise en évidence des activités actuelles et futures des utilisateurs. Comme nous avons pu le décrire précédemment, lors de l'étape de définition et d'évaluation des préconcepts, la démarche de simulation se déroule en trois temps au travers de :

- **la mise en place d'une démarche participative lors de la recherche de solutions**
- **la mise en place de scénarios**
- **la mise en place d'expérimentations pour l'évaluation des Interfaces Homme-Machine (IHM).**

On s'est servi ici des ressources, des compétences et des habilités que mettent en oeuvre les opérateurs dans leur activité, afin d'identifier les nouvelles fonctionnalités attribuées à l'outil correspondant à un usage particulier (GALINIER, 1996). Au cours des réunions du groupe projet, on a ainsi cherché à identifier la dimension invariante des activités : les schèmes d'utilisation des opérateurs, sur lesquels il est possible de concevoir autrement. En effet, concevoir autour des schèmes, revient à considérer la dimension évolutive des futurs dispositifs au travers de celle des utilisateurs. Les schèmes ont pu inspirer aux concepteurs des modes opératoires pour des dispositifs très différents de ceux avec lesquels l'opérateur agit actuellement (RABARDEL, 1995). C'est ce qui a pu être mis en évidence lors de la construction des scénarios d'utilisation concernant le manipulateur de traction freinage.

On a ainsi cherché à décrire les tâches selon les objectifs des opérateurs (SEBILLOTTE, 1991) et non selon les objectifs des concepteurs. C'est donc à partir des représentations que

possèdent les opérateurs, que l'on a pu analyser et décrire leur travail en vue de définir les préconcepts liés à la régulation de la vitesse des TGV futurs.

Sur la base de cette définition des préconcepts, le groupe projet a construit des maquettes de dispositifs qui intègrent les aspects techniques et fonctionnels des futurs produits. Ici, l'utilisation d'outils tels que la CFAO ou le prototypage rapide d'interfaces visuelles, a été déterminante pour aboutir aux définitions des maquettes de préconcepts. Ces outils nous permettent de faire évoluer la définition des préconcepts au fur et à mesure de leur conception et constituent, et nous avons pu vérifier en accord avec les travaux de LEBAHAR (1997), qu'ils sont de véritables supports à la simulation. En effet, la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) nous a permis de faire vivre les préconcepts concernant les futurs dispositifs sur le TGV, avant même l'existence d'une maquette. Les outils utilisés ont permis d'illustrer les aspects fonctionnels des produits, ce qui a permis au groupe projet de réajuster les recommandations fonctionnelles en facilitant le dialogue entre les différents corps de métiers présents au sein du groupe projet.

Lors des expérimentations, nous avons utilisé la simulation dans un objectif de conception. Deux types de situations ont été rencontrés : La simulations comme « banc d'essai », et la simulations comme dimension intrinsèque de la conception (BEGUIN et WEILL-FASSINA, 1997). Ces deux aspects de la simulation en phase de conception étaient étroitement liés car présent lors de chaque expérimentations. En effet :

? concernant la simulation comme « banc d'essai » d'une situation, celle-ci a permis de tester l'efficience, d'améliorer et de valider les maquettes proposées, en créant pour l'occasion une situation respectant au plus près les caractéristiques matérielles futures. Nous avons essentiellement cherché ici à évaluer les performances observées en faisant référence aux performances attendues, définies par le champ des activités futures souhaitables. Ainsi, nous avons pu faire évoluer les recommandations concernant les futurs produits au fur et à mesure des évaluations, ce qui a amené les concepteurs à remettre en cause plusieurs préconcepts, même si ils apparaissaient performants et fiables d'un point de vue technique
? la simulation comme dimension intrinsèque de la conception, nous a permis d'avoir une vision dynamique des préconcepts et de leurs fonctionnalités. L'examen de l'utilisabilité des dispositifs mené au cours des expérimentations, a permis de faciliter la remise en cause des

préconcepts proposés, au travers d'une mise en évidence flagrante des problèmes rencontrés par l'utilisateur. Ici, la mise en place des boucles de conception-évaluation propre à notre démarche de simulation a permis d'affiner les hypothèses formulées par le groupe projet lors de la définition du champ des activités futures souhaitables et de valider les choix effectués en termes de fonctionnalité et d'utilisabilité concernant les dispositifs futurs.

Ces caractéristiques liées à la simulation se retrouvent de manière conjointe lors de nos expérimentations, dans la mesure où les outils d'évaluations utilisés ainsi que les démarches sont communs au groupe projet. Ainsi, les ergonomes et les utilisateurs ont pu se rendre compte de la difficulté de mettre en place une solution technique proposée, et par le fait, établir des compromis entre ce qui est à faire et ce qui pourra être fait. Les concepteurs quant à eux ont pris conscience que l'examen de l'utilisabilité des produits permet d'enrichir leurs connaissances en leur donnant une vision plus large du produit.

Nous avons ainsi modifié progressivement nos préconcepts, et réalisé des adaptations sur les maquettes des préconcepts retenus. Les expérimentations effectuées, sur la base d'outils communs au groupe projet, ont donné une vision plus juste de l'évolution des solutions au sein du groupe de travail, la représentation des différents acteurs ayant cette fois-ci un support commun.

Il nous faut maintenant être vigilant dans l'analyse des conséquences de l'introduction des nouveaux outils sur l'activité future, et donc sur la performance globale future du système homme-machine. Lors de la conception d'outils coopératifs tels que les nouveaux dispositifs en cabine de conduite du TGV, il apparaît nécessaire de valider (GAILLARD et LEROUX, 1996) :

? Les différentes modalités de réalisation des fonctions d'aide, l'évolution de la répartition des rôles, les aides,...
? L'interface en termes de dialogue, de présentation des informations, de cohérence entre les différents outils,...
? l'intégration des outils entre eux et au sein de l'environnement futur.

Il nous faut donc tester maintenant l'amélioration globale de la performance du système lié à la régulation de la vitesse, selon le point de vue des utilisateurs, des concepteurs et de l'activité future globalement examinée.

En effet, si nous prenons l'exemple des informations sonores, de nombreux travaux montrent l'influence de l'expérience de la personne sur la perception des sons (LAZARUS et HÖGE, 1986 ; EDWORTHY et coll. 1991 ; HELLIER et coll., 1993 ; MOMTAHAN et coll., 1993 ; EDWORTHY, 1994). L'évaluation des sons en cabine de conduite TGV, ne peut donc se faire que par les conducteurs de TGV, dans un contexte recréant de la manière la plus proche possible certaines conditions d'exercice de l'activité.

Il en est de même concernant les commandes que de nombreux auteurs nous invitent à valider par le biais d'expérimentations (BYSTRÖM, 1994). Leur implantation doit faire l'objet d'études spécifiques dans la mesure où une mauvaise prise en compte de la position relative de la commande avec d'autres commandes, ou par rapport au conducteur, peut être une cause d'erreur, voire d'accident au cours de l'activité de conduite. Ainsi, plusieurs auteurs montrent dans le cadre de la conduite automobile qu'il peut exister des erreurs liées au placement relatif des pédales d'accélération et de frein ROGERS et WIERWILLE (1988), que les temps de réaction des conducteurs varient en fonction de l'emplacement de la pédale de frein MORRISON et coll. (1986). Il faut souligner que ces études se déroulent dans des contextes permettant de reproduire certaines conditions d'exercice de l'activité de conduite, en plaçant les conducteurs dans des environnements proches de ceux rencontrés en conduite réelle.

A ce stade de l'étude, nous avons donc choisi de mettre en place la validation du concept global lié à la régulation de la vitesse, qui consiste à faire travailler l'opérateur dans une situation la plus réaliste possible (GARCIA, 1991). Nous allons donc, dans le chapitre suivant, définir le cadre de nos évaluations, qui cette fois-ci s'effectueront sur un simulateur d'étude et de conception.

4. MISE EN PLACE DES EXPERIMENTATIONS SUR SIMULATEUR D'ETUDE ET DE CONCEPTION

Mise en place des expérimentations sur simulateur

Suite à l'étape de définition des préconcepts, de nombreuses questions restent posées par le groupe projet concernant **l'utilisabilité du concept global lié à la régulation de la vitesse**. Nous avons donc choisi de mettre en place **un simulateur d'étude et de conception**, afin de pouvoir étudier le concept global retenu concernant la régulation de la vitesse qui comprend le manipulateur de traction freinage, le système VI, les interfaces visuelles et les alarmes sonores. La mise en place de ce simulateur va nous permettre **d'évaluer**, **d'optimiser** et de **valider** progressivement le concept lié à la régulation de la vitesse du poste de conduite des TGV futurs, au travers de l'examen de la performance du système homme/machine.

En effet, de la même manière que lors de l'étape de définition des préconcepts, nous allons réaliser des boucles conception-évaluation itératives qui cette fois-ci vont concerner le concept global lié à la régulation de la vitesse. Le groupe projet va ainsi pouvoir tester les hypothèses formulées lors de la définition du champ des activités futures souhaitables et valider les choix effectués concernant l'utilité et l'utilisabilité des fonctions du concept lié à la régulation de la vitesse.

Nous nous situons ici en phase d'études détaillées concernant le concept global lié à la régulation de la vitesse. Il reste cependant suffisamment de degré de liberté pour pouvoir apporter différentes modifications sur le concept, même si l'objectif est d'aboutir à sa validation finale sur simulateur.

Dans ce chapitre, après avoir décrit le simulateur mis en place, nous présenterons de manière générale le protocole des expérimentations mises en oeuvre ainsi que les résultats attendus lors de la phase d'évaluation et d'optimisation du concept lié à la régulation de la vitesse.

4.1 Le simulateur d'étude et de conception pour la conduite ferroviaire

4.1.1 Présentation générale du simulateur

En accord avec les objectifs fixés par le groupe projet, l'ERCO a décidé de mettre en place un simulateur dédié à la conduite ferroviaire, en vue de pouvoir mener un certain nombre d'évaluations sur le concept global lié à la régulation de la vitesse.

L'ERCO a ainsi développé un simulateur que nous avons qualifié d'étude et de conception, dans la mesure où celui-ci a pour principale caractéristique de permettre à un groupe projet de mener des études au fur et à mesure de l'avancement des phases de conception. Les différentes évaluations vont ainsi porter sur l'ensemble du système conducteur/ concept lié à la régulation de la vitesse.

Ce simulateur d'étude et de conception nécessaire à l'évaluation, à l'optimisation et à la validation du concept lié à la régulation de la vitesse, a donc été conçu en respectant les critères suivants :

? il reproduit l'environnement juste nécessaire à la simulation de l'activité de régulation de la vitesse, afin de **tester** le concept lié à la régulation de la vitesse et **de valider** sa mise en place sur une rame prototype de TGV futur.

? il apporte une importante **modularité** nous donnant la possibilité de mettre en place très rapidement les préconcepts à évaluer et **d'optimiser** la solution retenue (dispositifs informationnels ou commandes physiques),

? il permet la **reproductibilité** des situations créées (environnement, scénarios d'utilisation,...), afin de tester avec les conducteurs, les différents préconcepts proposés pour un même dispositif.

? il fourni au travers **d'expérimentations**, un support à la verbalisation des conducteurs (techniques d'autoconfrontation).

Soulignons que l'utilisation de ce simulateur a pour premier objectif l'évaluation globale, au cours de sa conception, du système lié à la régulation de la vitesse des futurs TGV. Suite aux différents cycles d'évaluation-optimisation, le groupe projet pourra valider l'intégration du concept lié à la régulation de la vitesse dans le poste de conduite de la rame prototype du TGV futur, en vue des dernières évaluations sur le terrain.

La structure du simulateur a ainsi été simplifiée puisqu'il ne reproduit pas l'ensemble des composants liés à l'activité de conduite mais essentiellement ceux qui permettent de reproduire l'activité de régulation de la vitesse. Ainsi, la mise en place de ce simulateur a été accélérée dans la mesure où un grand nombre de développements ont été auparavant effectués lors de l'étape de définition des préconcepts.

4.1.2 Description du simulateur d'étude et de conception

A. Architecture générale

Un calculateur gère l'ensemble du simulateur. Ce calculateur, de type station de travail SUN SparcStation 10 communique avec 4 PC Pentium par réseau Ethernet. Chaque PC prend alors en charge la gestion des différentes Interfaces Homme-Machine. De même, l'environnement sonore est géré par un PC dédié, celui qui nous avait permis la mise en place du banc d'essai. La *Figure 49* décrit les rôles des différents éléments du simulateur, la Figure 50, représente la partie informatique extérieure à la cabine de conduite.

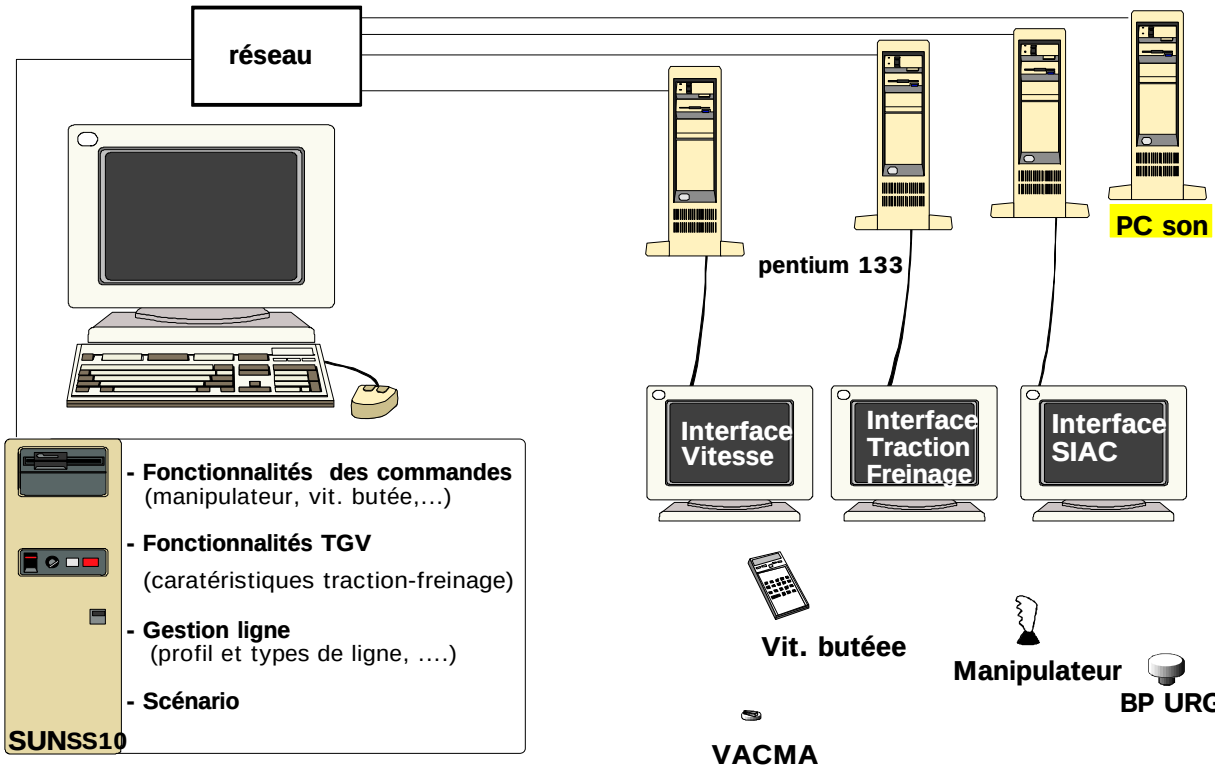


Figure 49 : Description des différents éléments du simulateur

Figure 50 : Vue du matériel informatique à l'extérieur du simulateur

Du fait de la durée très limitée de l'étude, il fallait concevoir un simulateur en limitant les développements poussés. Par contre, nous avons particulièrement mis l'accent sur l'interactivité des dispositifs mis en place, en accord avec les travaux de WADE ALLEN et ROSENTHAL (1994) dans le domaine de la conduite automobile. Nous avons privilégié la synchronisation de nos différents modules, au travers de l'utilisation d'une station de travail centrale, qui nous permet de gérer l'ensemble des modules du simulateur. Le temps de cycle moyen obtenu pour le simulateur est de 0.2s, ce qui nous permet largement d'assurer les critères d'interactivité compte tenu de l'inertie des rames TGV, et de relever l'ensemble des actions menées par les conducteurs qui effectuent les expérimentations.

B. La maquette cabine et le pupitre

Afin de recréer un environnement proche de la conduite, il est essentiel en premier lieu de reproduire l'espace de travail dans lequel se trouve le conducteur. A cet effet nous avons construit une maquette en bois à l'échelle 1 (Figure 51) de l'intérieur cabine, en nous appuyant sur les dimensions du TGV du réseau transmanche qui est actuellement le seul TGV avec pupitre central.

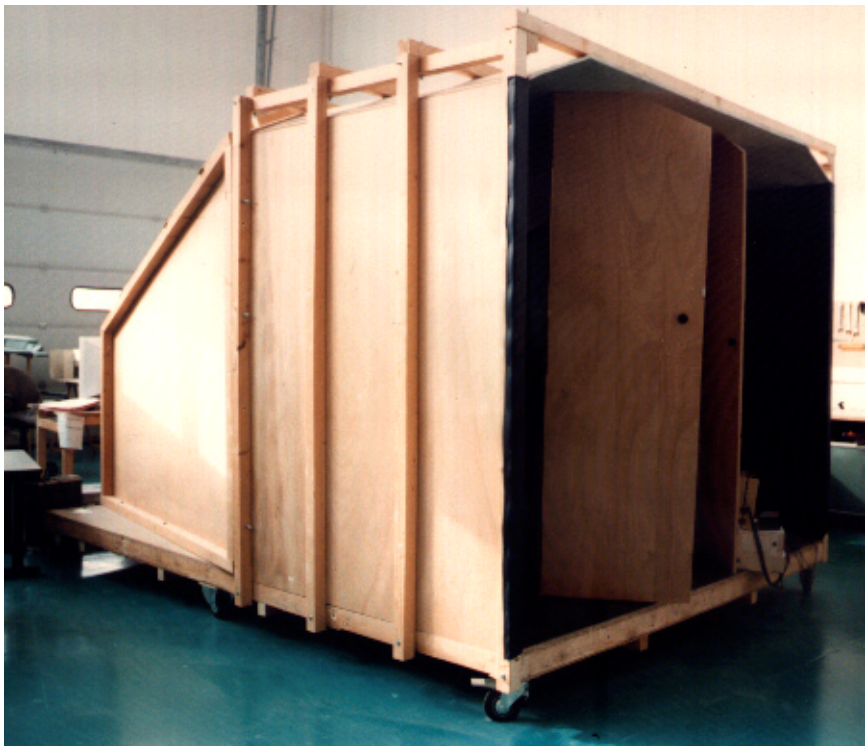


Figure 51 : Vue extérieure de la maquette échelle 1, du volume cabine

Les panneaux intérieurs ont été recouverts des matières actuellement utilisées dans les cabines des TGV atlantique, ce qui a permis de recréer cette sensation d'isolement et de confinement ressentie en cabine, tout en favorisant la reproduction de l'ambiance sonore.

Le pupitre, qui a fait l'objet d'une maquette d'évaluation en phase de définition des préconcepts, a été inséré dans la cabine, afin de pouvoir valider ses dimensions et tester l'implantation des commandes lors de leur utilisation par les conducteurs en contexte de conduite simulée.

Nous avons ensuite mis en place l'ensemble des éléments liés au concept de régulation de la vitesse, en laissant de côté les éléments liés à la préparation de la rame, qui n'interviennent pas directement dans les phases de conduite et donc lors de la régulation de la vitesse. Nous avons installé dans la cabine de simulation les maquettes développées en phase de définition des préconcepts (Figure 52) : les interfaces visuelles, le manipulateur de traction freinage, le boîtier de vitesse imposée (VI), mais également une maquette de commande VACMA, puisqu'elle influence le niveau de vigilance du conducteur et constitue un élément à part entière de la conduite.

Figure 52 : Vue de l'intérieur du simulateur d'étude et de conception pour la conduite ferroviaire

On aperçoit Figure 52, les trois écrans et le boîtier VI. La commande VACMA est maintenue dans la main gauche du conducteur et le manipulateur, ici placé à droite est masqué par le conducteur. A noter que le siège retenu est un siège actuellement mis en place sur les TGV. Sur le téléviseur placé en hauteur, figure l'image de l'environnement extérieur envoyée par un vidéodisque, technique que nous allons détailler dans le paragraphe suivant.

Dans la mesure où l'équivalence fonctionnelle et psychologique, est plus importante que la réalité physique, dans la conception d'un simulateur (LINTERN, 1989), nous n'avons pas forcément cherché à reproduire les composants existants des cabines de conduite (matière du pupitre, vitres extérieures, ensemble des commandes de confort : essuie vitre, réglage climatisation,..). Par contre, nous nous sommes appuyés sur l'analyse de l'activité menée lors de la première phase du projet, pour identifier l'ensemble des facteurs à prendre en compte afin d'assurer un bon déroulement des simulations et faire en sorte que l'environnement de simulation ne puisse pas perturber les conducteurs.

C. Simulation de l'environnement visuel extérieur :

La simulation de l'environnement visuel extérieur est possible par l'utilisation de deux approches relativement différentes, à savoir : l'utilisation de films vidéographiques ou l'animation d'images de synthèse. Ces deux types de simulation ont donné lieu à de nombreuses études s'intéressant à la prise d'informations visuelles par rapport à un environnement réel ou simulé (MESTRE, 1987; NEMIRE, 1994 ; WIERWILLE et FUNG, 1975), mais c'est essentiellement la praticité et la facilité de mise en oeuvre qui constitue le facteur de choix de l'une ou l'autre de ces techniques.

Le côté pratique que présente un environnement utilisant des images virtuelles est essentiellement lié à la possibilité de construire des scénarios spécifiques en créant des situations particulières, rarement rencontrées dans la réalité. Mais la reproduction fidèle de l'environnement, prenant en compte les variations du climat, les niveaux d'ensoleillement,..., nécessite des développements longs et coûteux.

Concernant l'environnement visuel du simulateur d'étude et de conception, nous avons employé une technique utilisant un vidéodisque. Cette technique consiste à filmer à vitesse constante l'environnement à simuler, avec certaines précautions (stabilité de l'image, ...). Les images ainsi enregistrées sont ensuite restituées par un lecteur de vidéodisque laser sur un écran de télévision (Figure 52). C'est cette technique qui est utilisée sur les simulateurs de formation de la SNCF.

L'image est issue d'un film réel tourné sur différentes lignes et est synchronisée par rapport à la vitesse calculée du train. En effet, les images sont enregistrées à deux vitesses réelles de train soit 30 et 45 km/h. En fonction de la vitesse affichée par le simulateur, un code correspondant permet de piloter le lecteur de vidéodisque laser. Ainsi, l'ensemble des éléments de la ligne figure sur le film, nous permettant d'exploiter les connaissances de lignes des conducteurs qui avaient circulé sur les lignes concernées.

La simulation par lecteur de vidéodisque laser présentait donc pour nous l'avantage d'obtenir une restitution extrêmement fidèle sur la base des films. Par contre, elle présente des inconvénients dans la mesure où les événements inclus dans les scénarios sont limités et qu'il n'existe pas de films réalisés sur lignes à grande vitesse (LGV).

Comme les situations de conduite sur lignes classiques (LC) sont beaucoup plus difficiles à gérer par les conducteurs que les situations de conduite sur LGV, il a été décidé par le groupe projet que les évaluations se limiteraient à ces situations de conduite sur lignes classiques. Concernant la constitution des scénarios, nous avons pu repérer sur les différents vidéodisques de nombreuses situations de conduite classique ainsi que des situations présentant des cas particuliers de conduite (objet accroché à la caténaire, train arrêté sur la voie,...). En effet, ces films étant réalisés au niveau de la SNCF pour assurer la formation des conducteurs sur simulateur, ils ont également pour objectif de confronter les personnes en formation à des situations anormales se présentant sur la voie. Ainsi, nous avons pu obtenir une bibliothèque de situations de conduite suffisamment complète, afin de procéder au montage de nos scénarios.

D. La simulation de l'environnement sonore

Le bruit en cabine de conduite, constitue un des principaux indicateurs pour le conducteur concernant l'état de sa machine. En effet, le conducteur arrive facilement à identifier, lors d'une panne de bogie moteur lequel d'entre eux est concerné. De plus le bruit donne une indication concernant les modifications de demande de traction, lors du passage de la traction électrique au freinage électrique et au freinage pneumatique (BOLLON et coll., 1992).

Ce sont en fait ces indicateurs informels, principalement liés à la vitesse des moteurs, et donc du train, qui apportent des informations complémentaires aux conducteurs. En accord avec les travaux de MC LANE et WIERWILLE (1975), nous avons donc mis en place un système de reproduction de l'environnement sonore, prenant en compte essentiellement les sons liés à la vitesse du train. Nous avons repris les éléments du banc d'essai qui avaient été mis en place lors de la phase de définition des préconcepts (Figure 53). Afin de reproduire l'environnement sonore dans la maquette de la cabine de TGV, il nous restait à relier les informations de vitesse et de traction entre le PC son et le simulateur. Nous avons ainsi pu reproduire un son interactif et à étalonner les niveaux sonores des différents sons au sein de la maquette et ceci pour différentes plages de vitesse.

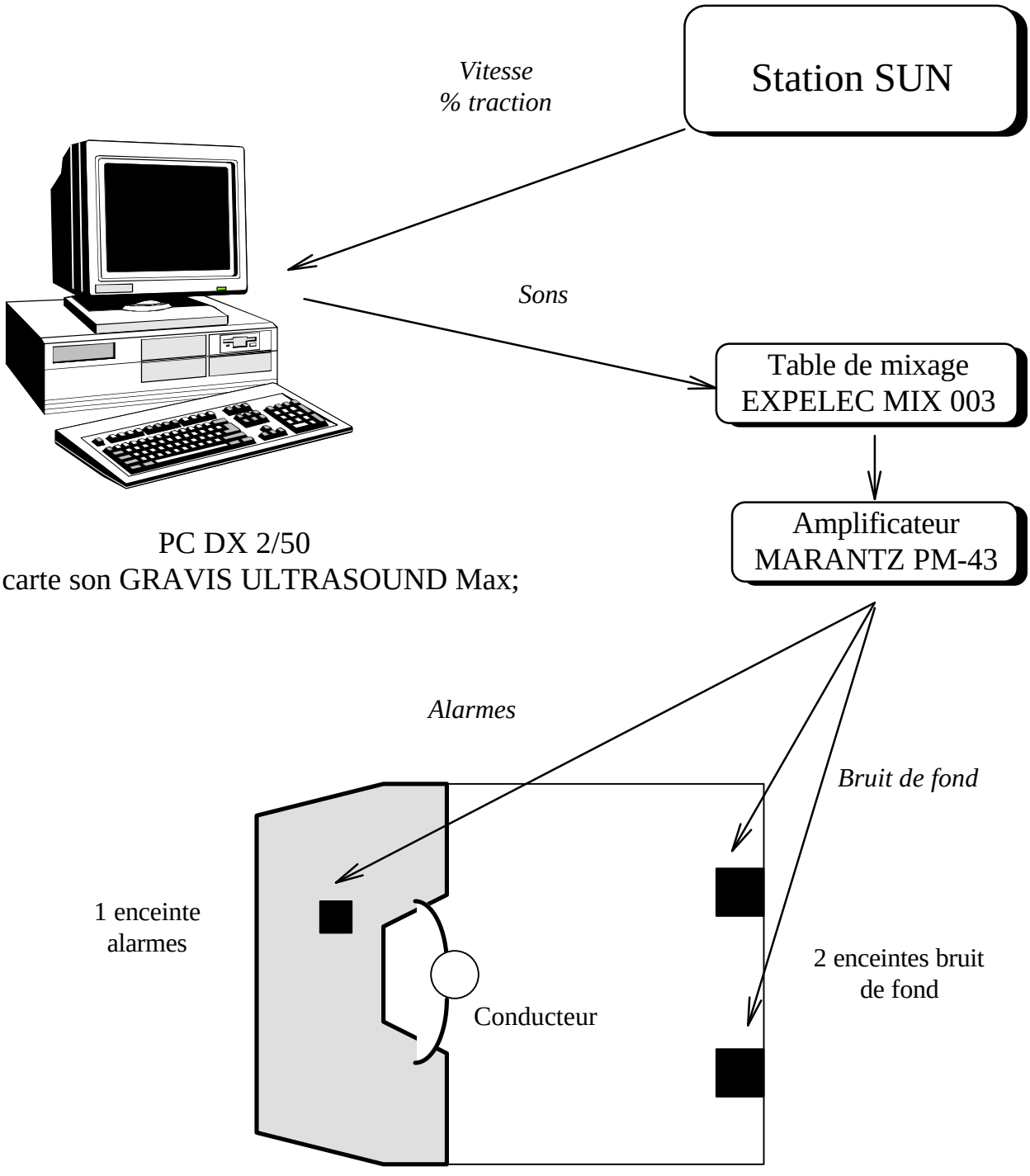


Figure 53 : Dispositifs mis en place concernant la reproduction des sons dans la cabine du simulateur

E. Description du fonctionnement du simulateur

La procédure mise en place nous permet de démarrer simultanément tous les éléments composants le simulateur (scénario, vidéodisque, enregistrement des données, modules pilotant chacun des dispositifs - interfaces et manipulateur). Pour chaque scénario défini, il nous est donc possible de relever toutes les informations concernant l'état du système (événements, consignes de vitesse, état des dispositifs traction/freinage, ...) et toutes les données sur les actions que le conducteur effectue sur les commandes. La modification des scénarios est très simple et n'implique pas de programmation poussée. Un module de pré traitement des données permet de les récupérer aisément sous forme de fichier EXCELL en vue des dépouillements.

La mise en place de ce simulateur a été largement simplifiée par l'étape de définition des préconcepts, au cours de laquelle nous avions déjà mis en place un certain nombre de composants de l'environnement de conduite. A noter également que l'utilisation des écrans en cabine, combinée à l'outil de prototypage rapide VAPS évite la mise en place d'un nombre important de composants « hards », type manomètres ou ampèremètres, difficilement reconfigurables au cours des expérimentations. Ces outils de prototypage rapide font gagner un temps précieux lors de la modification des interfaces visuelles, et permettent également de venir insérer des éléments perturbateurs ou informationnels selon les scénarios prévus.

Ce **simulateur d'étude et de conception** qui a une structure assez simple, a pu être développé dans un délai de 6 mois. Il n'a rien de comparable aux simulateurs qui permettent l'étude des comportements humains et qui ont pour principale caractéristique la reproduction au plus juste de l'environnement de conduite. La reproduction des mouvements du train et la définition par image de synthèse de l'environnement n'ont pas été considérées comme essentielles.

Ici, c'est la praticité de l'outil et sa modularité qui ont été privilégiées, nous permettant de répondre aux objectifs de simulation en phase de conception et d'évaluation, que nous nous étions fixés, à savoir :

? évaluer et optimiser le concept final retenu au travers de la mesure subjective et objective de la performance du système homme/commande de régulation de la vitesse,

? établir un compromis satisfaisant l'ensemble des acteurs du projet (clients, utilisateurs, ingénieurs, ergonomes,...), en ce qui concerne le concept de régulation de la vitesse des TGV futurs.

? faciliter le dialogue entre les différents acteurs du projet.

4.2 Mise en place des expérimentations

Les expérimentations mises en place à ce niveau de l'étude ont pour objet l'évaluation, l'optimisation et la validation du concept lié à la régulation de la vitesse, en phase de conduite simulée. Nous cherchons donc à évaluer l'amélioration globale de la performance concernant le système lié à la régulation de la vitesse, selon le point de vue des utilisateurs, des concepteurs, des exploitants et du champ des activités futures souhaitables. Ces évaluations vont permettre d'optimiser le concept lié à la régulation de la vitesse, mais vont surtout permettre d'apporter des réponses à l'ensemble des membres du groupe projet concernant l'utilisabilité du concept lié à la régulation de la vitesse.

Nous avons donc dans un premier temps constitué un échantillon représentatif de conducteurs qui vont participer aux différentes évaluations. Nous avons ensuite mis en place un protocole d'évaluation spécifique, nous permettant de tester le concept lié à la régulation de la vitesse afin de recueillir des données à la fois subjectives et objectives concernant l'utilisabilité des dispositifs futurs.

4.2.1 Echantillon de conducteurs retenus

L'analyse de l'activité (BOLLON et coll.,1992) a permis de montrer que les conducteurs utilisent différentes stratégies de conduite qui dépendent essentiellement de leur âge et de leur formation. Ainsi, en faisant référence à l'ouvrage de DE LA CRUZ et ROCHE (1990), qui fait un descriptif assez détaillé de la répartition des conducteurs en fonction de leur âge et de leur grade, nous avons constitué un groupe de 12 conducteurs qui représentent le plus largement possible la population française des conducteurs.

Cinq des 12 conducteurs retenus ont fait partie des réunions initiales du groupe projet en tant qu'experts de la conduite TGV, et ceci dès l'étape d'analyse de l'existant. Les 7 autres ont intégré l'étude lors de l'étape de définition des préconcepts et ont été sélectionnés sur la base d'une expérience spécifique (conduite d'un TGV transmanche, TGV essais,...) ou parce qu'ils sont novices vis-à-vis de la conduite TGV. Cette intégration au groupe projet de novices concernant la conduite TGV, a permis d'apporter un avis complémentaire concernant l'éventuelle généralisation de l'implantation du concept lié à la régulation de la vitesse sur l'ensemble des trains du réseau français (trains voyageurs classiques, fret,...).

Il était convenu avec les conducteurs que dans la mesure du possible, ils serviraient de relais entre le groupe projet et les autres conducteurs de leurs dépôts respectifs. Ainsi, à chaque étape du projet, les conducteurs retenus avaient pour mission de faire part à leurs collègues de dépôt des évolutions envisagées, et de remonter les remarques formulées lors des réunions du groupe projet.

Le Tableau 4 suivant reprend quelques caractéristiques propres aux conducteurs du groupe d'évaluation. Nous avons indiqué les plages d'âges dans lesquelles se situaient les conducteurs pendant la durée de l'étude, ainsi que les grades des conducteurs (L'agent de grade T3, élève conducteur, est conducteur en titre, responsable du convoi, mais il peut encore, de temps à autre effectuer une fonction d'agent d'assistance. L'agent de grade T4 est conducteur de route autorisé à faire des trains au delà de 120 km/h, c'est à partir de là qu'il devient mécanicien. L'agent de grade T5 est conducteur de route principale, il a une ancienneté au moins égale à 12 ans). Nous avons ainsi pu consulter la pyramide des âges des conducteurs (DE LA CRUZ ; ROCHE ; 1990) et vérifier qu'en fonction de leur grade et de la plage d'âge chaque conducteur est représentatif d'un large segment de la population des conducteurs.

Conducteurs	plage d'âge	Grade	Dépôts	Expérience	Intégration/groupe projet
1	40-45	T4	Lyon	TGV PSE	Définition des préconcepts
2	50-55	T5	Tours	TGV Atlantique	Etude de l'existant
3	40-45	T4	Lille	Transmanche TGV Eurostar	Définition des préconcepts
4	35-40	T3	Tergnier	Trains classiques Novice TGV	Définition des préconcepts
5	45-50	T5	Lyon	TGV PSE	Définition des préconcepts
6	45-50	T5	Rennes	TGV Atlantique	Etude de l'existant
7	50-55	T5	Paris	TGV Atlantique	Etude de l'existant
8	30-35	T3	Tergnier	Trains classiques Novice TGV	Définition des préconcepts
9	25-30	T3	Tergnier	Trains classiques Novice TGV	Définition des préconcepts
10	50-55	T5	Nîmes	TGV PSE	Etude de l'existant
11	50-55	T5	Paris	Essais TGV tous les TGV	Définition des préconcepts
12	40-45	T4	Chambéry	TGV PSE	Etude de l'existant

Tableau 4: Conducteurs retenus pour la phase d'évaluation du concept lié à la régulation de la vitesse.

Cet échantillon de 12 conducteurs n'est qu'indicatif, mais est assez représentatif des conducteurs qui auront à utiliser les futurs dispositifs. De plus, ces conducteurs sont régulièrement amenés à effectuer des formations sur simulateur de conduite ferroviaire. Ainsi, lorsqu'ils abordent les différents exercices proposés sur simulateur, ils le font donc de manière très professionnelle, et s'impliquent fortement dans leur exécution. Le côté professionnel des utilisateurs, contribue ainsi largement à l'obtention de résultats crédibles concernant l'analyse de l'utilisation des dispositifs en phase de conduite simulée.

4.2.2 Protocole général des expérimentations sur simulateur

Le protocole général que nous avons mis en place pour les expérimentations (Figure 54), s'est déroulée en trois temps au cours de :

? la pré-expérimentation,

? l'évaluation intrinsèque du concept lié à la régulation de la vitesse,

? l'évaluation globale du concept lié a la régulation de la vitesse.

Les évaluations sont composées d'une partie analytique qui s'appuie sur les verbalisations des conducteurs et d'une partie empirique qui étudie les critères objectifs relevés lors des simulations.

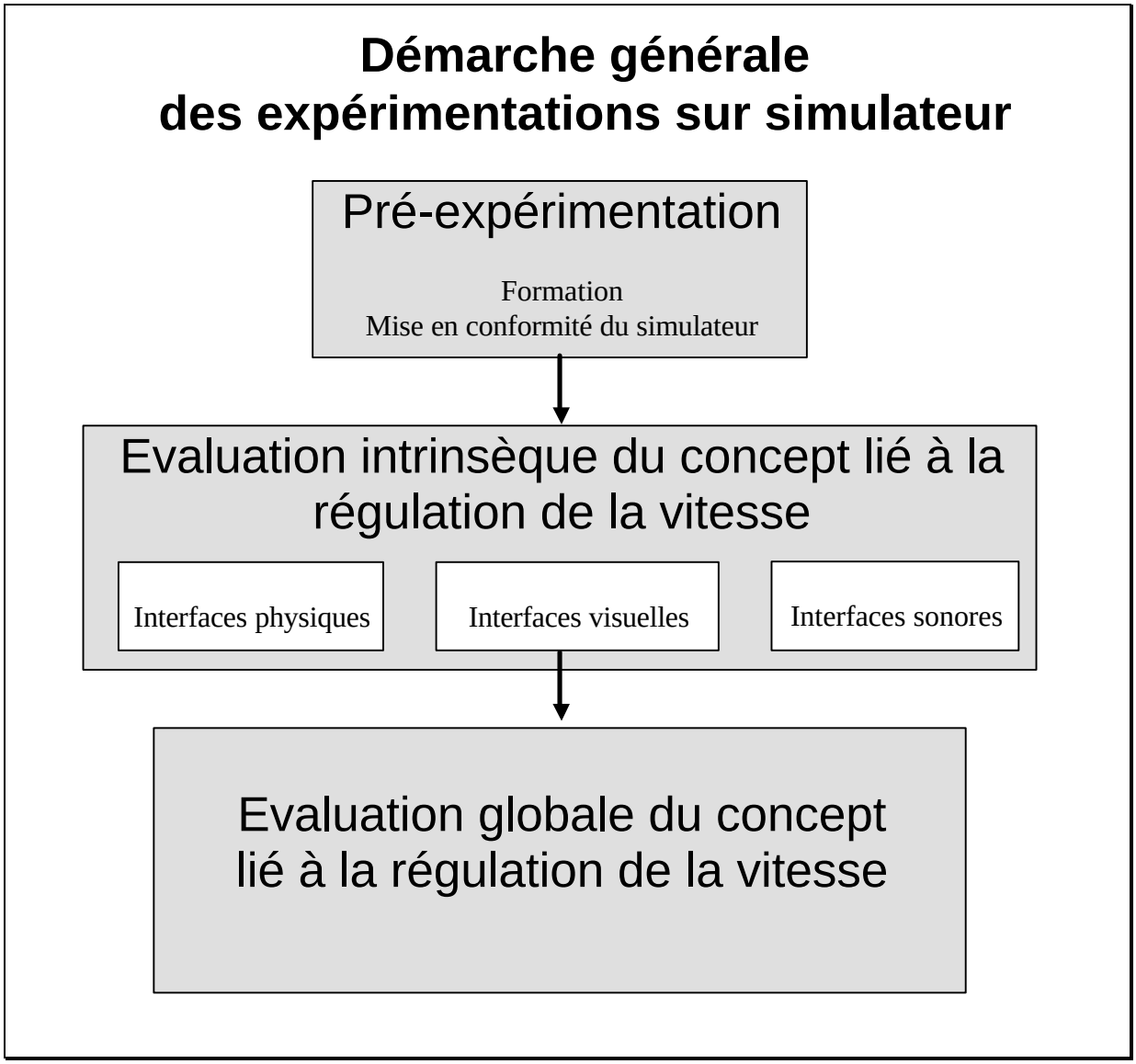

Démarche générale
des expérimentations sur simulateur
Pré-expérimentation
Formation
Mise en conformité du simulateur
Evaluation intrinsèque du concept lié à la régulation de la vitesse
Interfaces physiques
Interfaces visuelles
Interfaces sonores
Evaluation globale du concept lié à la régulation de la vitesse

Figure 54 : Démarche générale des expérimentations sur simulateur.

Les trois phases de cette étude ont nécessité la présence de chaque conducteur pendant 5 jours. Lors de la première phase, l'ensemble des conducteurs étaient présents. Lors des phases 2 et 3, nous avons demandé aux conducteurs de venir par groupes de 2, afin de pouvoir coupler la passation des scénarios et des verbalisations. Un mois était prévu entre le début de chaque phase, dans l'objectif d'analyser les résultats et de réaliser les modifications sur les dispositifs au fur et à mesure de l'avancement des résultats. Les expérimentations que nous allons décrire dans la suite de ce document, se sont ainsi étalées sur une durée de 3 mois.

? Pendant la première phase de pré-expérimentation, nous présentons les nouveaux dispositifs de manière théorique à une douzaine de conducteurs, puis les conducteurs effectuent une phase de conduite libre sur simulateur d'environ 20 minutes par conducteur, au cours de laquelle ils prennent connaissance par la pratique de l'ensemble des nouveaux dispositifs. Cette phase d'apprentissage et de familiarisation permet de minimiser les biais dus à la non maîtrise du simulateur lors des phases suivantes et de valider les aspects fonctionnels des dispositifs sur simulateur. Elle est indispensable dans le cadre de l'évaluation de nouveaux dispositifs sur simulateur comme par exemple dans le cas des simulateurs de conduite automobile (PACHIAUDI et coll., 1996).

Cette phase, qui ne sera pas détaillée dans ce document, sert de pré-expérimentation et permet d'aboutir au respect de trois objectifs principaux :

- former les conducteurs de manière théorique sur les nouveaux dispositifs de conduite,
- effectuer une phase de familiarisation, pour chacun des conducteurs qui leur permet de prendre en main le système dans son ensemble à partir d'exercices pratiques sur simulateur,
- faire les derniers ajustements techniques sur le simulateur pour qu'il soit en adéquation avec les objectifs de notre expérimentation.

? Lors de la deuxième phase d'évaluation intrinsèque du concept lié à la régulation de la vitesse en situation de conduite simulée, qui sera détaillée dans le chapitre 0 suivant, nous plaçons les conducteurs dans des conditions spécifiques d'exercice de l'activité, afin d'identifier en situation dynamique les éventuelles incompatibilités entre les dispositifs retenus et la tâche demandée au conducteur. En effet, à ce stade de l'étude, les questions qui restent posées par le groupe projet, concernent essentiellement le comportement du système dans des situations de conduite perturbées (incidents, surcharge de travail, ...). Ainsi, les expérimentations mises en place ont pour objectif de placer les conducteurs dans des situations extrêmes de conduite pour pouvoir mettre en évidence les niveaux de performances atteints et les mettre en relation avec les objectifs d'exploitation des lignes prescrits par la SNCF. Ces types d'expérimentation sont fréquemment utilisés dans le cadre de l'évaluation des salles de contrôle industrielles. En effet, dans la mesure où il est peu probable de pouvoir observer une situation critique sur le terrain, les simulateurs sont utilisés pour créer les situations critiques et ainsi identifier les actions que pourrait engager un opérateur placé dans une situation

incidentelle (SIEBERT et coll., 1988). Ainsi, les concepteurs peuvent s'appuyer sur le support expérimental que constituent la simulation de certaines conditions d'exercice de l'activité, pour la conception de futures interfaces adaptées à un grand nombre de situations envisageables.

Ainsi, au cours de nos différentes évaluations, nous pouvons comparer différentes solutions, les tester, les optimiser et valider un grand nombre d'hypothèses concernant la performance globale du futur système conducteur/dispositifs liés à la régulation de la vitesse.

Lors de la troisième phase d'évaluation globale du concept lié a la régulation de la vitesse en situation de conduite simulée, nous cherchons à recréer autant que possible les conditions normales de conduite d'un TGV afin d'identifier les stratégies liées à l'utilisation du nouveau concept lié à la régulation de la vitesse. On laisse ainsi les sujets effectuer librement leur activité et les observations menées permettent d'identifier les éventuelles modifications des stratégies liées à la présence d'un nouvel outil. Ce type d'expérimentations menées dans le cadre de la conduite automobile concerne par exemple les aides à la conduite (MALATERRE et SAAD, 1986) ou les téléphones de voiture (PACHIAUDI et coll., 1996). Nos expérimentations portant sur les dispositifs futurs liés à la régulation de la vitesse des TGV, seront détaillées dans le chapitre intitulé «Deuxième série expérimentale : évaluation globale du concept lié à la régulation de la vitesse en situation de conduite simulée ».

5. PREMIERE SERIE EXPERIMENTALE : EVALUATION INTRINSEQUE DU CONCEPT LIE A LA REGULATION DE LA VITESSE EN SITUATION DE CONDUITE SIMULEE

Lors de cette première série expérimentale, nous nous sommes essentiellement attachés à répondre aux **questions spécifiques** qui restent **posées par les membres du groupe projet,** concernant l'utilisation du nouveau concept lié à la régulation de la vitesse qui intègre des interfaces physiques, visuelles et sonores. Ces différentes questions qui restent posées concernent essentiellement **l'évaluation de la performance du système conducteur/concept lié à la régulation de la vitesse** mis en place.

Mais caractériser la performance d'un tel système reste une étape délicate. En effet, la difficulté réside ici dans le choix des facteurs de performance qui peuvent varier en fonction des différents acteurs du groupe projet. Certains vont retenir des facteurs liés aux résultats obtenus par les conducteurs tandis que d'autres vont préférer faire référence à des critères qui caractérisent les moyens mis en oeuvre pour aboutir aux résultats.

Concernant la conduite ferroviaire, nous avons dans un premier temps retenu des critères très généraux, afin de constituer une première base de réflexion. Nous avons ainsi pu identifier avec le groupe projet que la performance en fonctionnement normal est bonne, si le système mis en place permet :

- **d'effectuer le trajet en toute sécurité.**
- **de respecter les horaires en gare.**
- **de respecter le confort des passagers.**
- **d'économiser l'énergie et le matériel**.

Par contre, dès que l'on quitte le mode de fonctionnement normal, ces objectifs peuvent être contradictoires (rattraper un retard et économiser l'énergie par exemple). La nature des compromis trouvés par les agents de conduite est alors très difficile à identifier et très variable en fonction de la situation rencontrée.

Afin de simplifier nos différentes évaluations concernant la mise en évidence de la performance des conducteurs, nous avons choisi ici de recréer des situations de conduites artificielles que nous avons appelées **scénarios de conduite imposée** et qui ont pour objectif de tester l'utilisation de chaque dispositif lors d'une situation extrême de conduite (surcharge d'informations, changements de vitesse répétitifs, alarmes sonores répétées,...), qui ne reflètent

pas forcément une situation de conduite classique. Ces scénarios permettent cependant **d'évaluer de manière intrinsèque le concept lié à la régulation de la vitesse** et de valider plusieurs des hypothèses formulées au cours des étapes antérieures (rapidité d'exécution, détection de l'information,...), hypothèses qui ne peuvent pas forcément être vérifiées sur le terrain dans le cas de situations accidentelles.

En fait, nous cherchons ici à vérifier certaines hypothèses concernant le champ des activités futures souhaitables en contexte de conduite simulée, concernant essentiellement les performances que les conducteurs peuvent obtenir dans des situations d'utilisations dites « critiques ». En effet, lors de la mise en place de dispositifs nouveaux, il est difficile de se rendre compte des difficultés que pourra éprouver l'utilisateur placé dans une situation critique. Ceci nous amène à examiner de manière précise, en phase de conduite simulée, plusieurs cas d'utilisation des dispositifs qui composent le concept de régulation de la vitesse afin de répondre aux questions spécifiques des concepteurs.

Dans ce chapitre, nous présenterons donc certains résultats liés à l'évaluation intrinsèque du concept global lié à la régulation de la vitesse sur la base de scénarios imposés. Nous avons retenu les évaluations concernant :

? **l'utilisation du manipulateur** lors de fréquents changements de consignes de vitesse. Ici, la question posée concerne l'évaluation de la performance de régulation des efforts de traction freinage obtenue lors de l'utilisation de la nouvelle commande lors de fréquents changements de vitesse.
? **la détection d'informations visuelles** par les conducteurs sur les trois écrans. Cette question émane à la fois des concepteurs, des exploitants et des conducteurs présents au niveau du groupe projet qui craignent que la surveillance des trois écrans en cabine puisse nuire à la surveillance des signaux extérieurs sur la voie.
? **l'interprétation des alarmes sonores**. Ici, on cherche à évaluer les alarmes sonores retenues en contexte de conduite, dans la mesure où la tâche principale de conduite est très prenante, il s'agit de vérifier que les alarmes choisies restent adaptées dans un contexte de conduite.

Ainsi, ces différents exemples vont nous permettre d'illustrer plusieurs techniques concernant les évaluations menées à ce niveau de l'étude, qui concernent essentiellement la

performance réalisée par le système conducteur/nouveau système lié à la régulation de la vitesse. En effet, il est intéressant de voir qu'en fonction des questions posées, les techniques d'évaluations ne seront pas les mêmes dans la mesure où les critères de performance seront différents.

5.1 Utilisation du manipulateur de conduite

5.1.1 Objectifs

Lors de cette étape, nous allons examiner l'utilisation du manipulateur de traction freinage sur la base de scénarios de conduite imposée. L'objectif ici, est de valider les choix de conception effectués en relation avec la définition du champ des activités futures souhaitables, en examinant l'utilisation du manipulateur en phase de conduite simulée. Nous détaillerons ici plus particulièrement les résultats liés :

- au choix des efforts à fournir pour actionner le manipulateur dans les différents modes,
- à l'examen de l'utilisation du manipulateur lorsque la consigne est de respecter au plus près des consignes de vitesse qui varient fréquemment.

Rappelons que le respect au plus près d'une consigne de vitesse n'est pas un objectif habituel pour les conducteurs, dans la mesure où une marge de manoeuvre importante est prévue sur l'ensemble du parcours (le conducteur peut se situer jusqu'à 20 km/h en dessous des consignes données). Par contre, le groupe projet a retenu cet indicateur comme un indicateur pertinent dans la mesure où cette marge de manoeuvre peut diminuer dans le futur. En effet, le nombre des trains présents sur une même ligne va certainement augmenter dans un futur proche, ce qui pourra conduire à des situations de surcharge de la ligne et donc à des séquences de changements de vitesse fréquents. De plus, on trouve déjà ces situations de respect des vitesses au plus juste, dans les cas de rattrapage des retards. En effet, si un conducteur rencontre un événement imprévu provoquant un retard, son objectif sera alors de tangenter au plus juste les consignes de vitesse, afin de chercher à respecter les horaires d'arrêts en gare.

5.1.2 Méthodes

A. Les scénarios

Nous avons défini deux scénarios permettant de reproduire de manière accélérée un grand nombre de situations de conduite. Lors de la passation des scénarios, les vitesses de consignes

sont données aux conducteurs à l'aide de l'interface vitesse sur laquelle figure un bandeau circulaire, indiquant les consignes de vitesse but et de vitesse but instantanée (Figure 56). Ainsi, les consignes de vitesse ne sont pas présentées sur l'image du vidéodisque présentant la voie. L'image du vidéodisque permet uniquement ici, de donner au conducteur une information liée à sa vitesse en fonction du défilement des images.

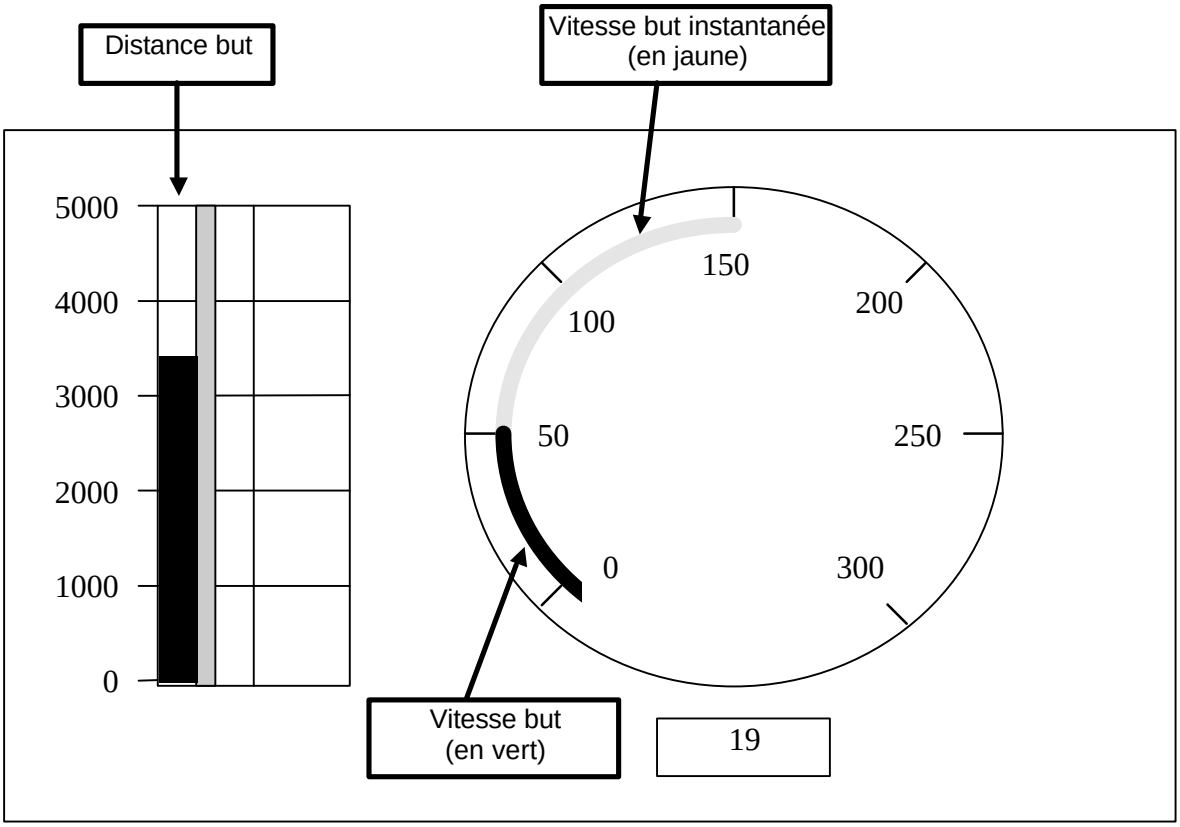


Figure 55 : Schéma de l'interface vitesse sur laquelle sont indiquées les consignes à respecter.

Ainsi, à chaque changement de consigne est affiché la nouvelle vitesse but à atteindre (bandeau fixe en vert) et la vitesse but instantanée lors des phases de freinage (bandeau jaune qui décroît progressivement). Cette vitesse but instantanée donne une indication au conducteur de la décélération minimum à engager, afin de respecter la vitesse but dans un temps donné.

Si un dépassement de plus de 5 km/h est effectué, un signal sonore indique au conducteur le dépassement de la vitesse.

La répétition de consignes rapprochées au cours des scénarios nous fait gagner un temps précieux, dans la mesure où nous pouvons, par exemple, reproduire les séquences de freinage d'un long parcours, pour une durée de scénario de 20 mn. Ces scénarios de conduite imposée, ne reflètent pas ici des situations de conduite classiques, mais dans la mesure où les

comportements de la rame future sont simulés, ils permettent d'évaluer les dispositifs dans des cas extrêmes d'utilisation en vue d'effectuer d'éventuelles modifications.

Scénario 1 : Il est demandé aux ADC, dans le cadre de cet exercice, d'atteindre une vitesse de 240 km/h par palier de 30 km/h et de décélérer par palier de 50 km/h pour le retour à l'arrêt. Le freinage est effectué en rhéostatique puisqu'il n'y a pas associé à ces actions de contrainte temporelle forte. Il leur est donc demandé de respecter des paliers de vitesse selon le polygone de vitesse Figure 56.

Ce scénario permet de vérifier que les conducteurs peuvent atteindre des vitesses de manière précise avec le manipulateur impulsionnel, que ce soit en phase d'accélération ou de décélération (Fe : freinage électrique).

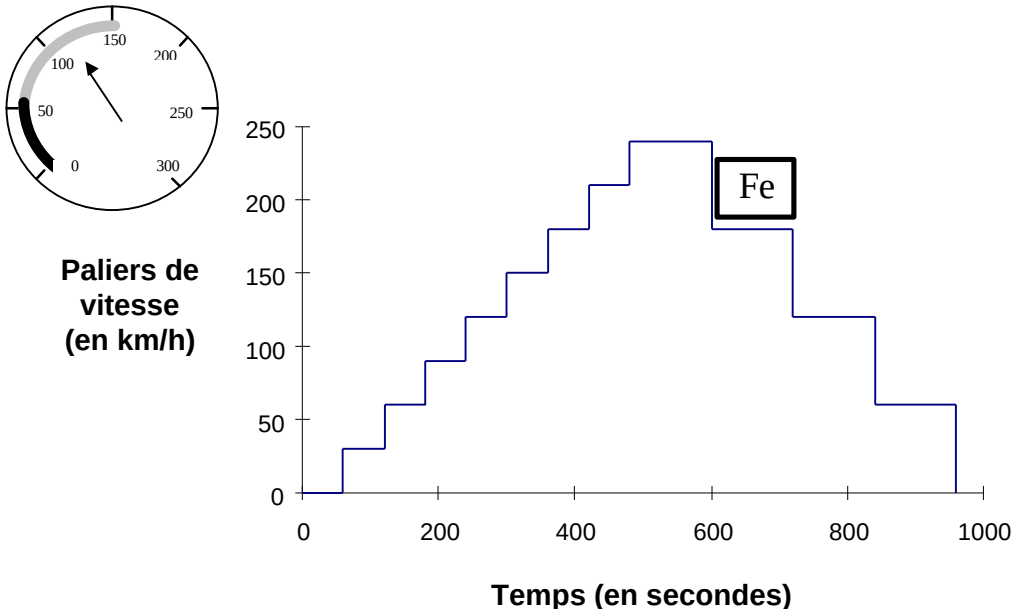


Figure 56 : Polygone des vitesses de consigne et mode de freinage approprié définissant le scénario 1

Scénario 2 : Il est demandé aux ADC, dans le cadre de cet exercice, d'atteindre une vitesse élevée (~300 km/h) dans un temps court, puis d'effectuer diverses phases de freinage. Il leur est donc demandé de respecter des paliers de vitesse selon le polygone de vitesse Figure 57.

Ce scénario permet de vérifier que les conducteurs peuvent atteindre de manière précise des consignes de vitesse présentant de fortes amplitudes, en utilisant différents modes de freinage (Fp : freinage pneumatique ; Fe : freinage électrique ; URG : freinage d'urgence).

Dans le cadre de ce scénario, les consignes liées aux phases de montée et de descente en vitesse se rapprochent de consignes réalistes de conduite, dans la mesure où les séquences ont été inspirées de situations réelles. Par contre, les périodes durant lesquelles le conducteur doit maintenir sa vitesse de manière prolongée, ont été raccourcies.

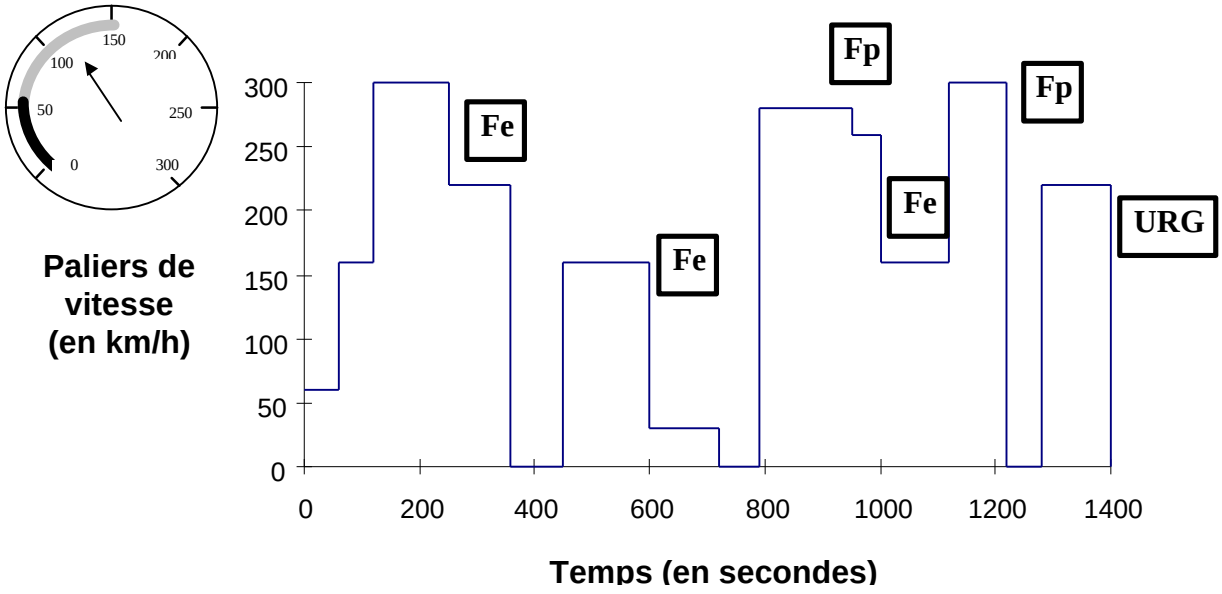


Figure 57:Polygone des vitesses de consigne et modes de freinage appropriés définissant le scénario2

Le conducteur a donc pour consigne de respecter au plus près les vitesses indiquées, de manière à contrôler que chaque conducteur réalise bien la même tâche indépendamment de leurs propres stratégies de conduite. Si le conducteur n'arrive pas à stabiliser sa vitesse en temps voulu, l'information de changement de vitesse lui est quand même envoyée, et nous tenons compte de sa difficulté à stabiliser la vitesse dans le traitement des résultats.

B. Déroulement des expérimentations

Rappelons que suite à la phase de définition des préconcepts, nous avions défini deux jeux d'efforts dans la plage d'efforts déterminée suite à l'expérimentation menée hors contexte de conduite. En effet, lors de ces premières expérimentations, il s'est avéré que plusieurs solutions pouvaient être envisagées et que pour les évaluer il fallait maintenant procéder à des essais en contexte de conduite. Les 12 conducteurs effectuent donc un premier essai avec le jeu d'efforts appelé «configuration 1», puis un deuxième essai avec le jeu d'efforts appelé «configuration 2» (cf. tableau p85).

Ces deux essais s'effectuent sur les scénarios 1 et 2. Le scénario 1 a été retenus, dans la mesure où il est très exigeant en termes de précision et de manipulation de la commande. Le scénario 2 permet lui, d'évaluer l'utilisabilité de l'ensemble des fonctions du manipulateur, puisque les conducteurs sont amenés à utiliser l'ensemble des fonctions du manipulateur afin de pouvoir respecter les consignes indiquées.

C. Les relevés

Nous relevons un certain nombre d'indicateurs subjectifs de manière à montrer la validité des choix retenus, en ce qui concerne le taux de satisfaction des futurs utilisateurs. Nous recueillons les verbalisations spontanées des ADC au cours de chacun des exercices dans le but d'obtenir des informations qualitatives sur le ressenti des conducteurs, ainsi que leur avis sur la facilité d'utilisation du manipulateur. Nous cherchons ici à détecter les éventuelles difficultés liées à l'interférence entre des modes opératoires acquis avec l'ancien système « cerclo» et les nouveaux modes opératoires qui doivent être mis en oeuvre pour utiliser le nouveau manipulateur de vitesse. Lors des passations, une caméra située dans le simulateur permet de filmer les actions du conducteur (Figure 58). Nous pouvons ainsi éventuellement revenir sur le film, si le conducteur éprouve une difficulté spécifique au cours du scénario et qu'il n'arrive pas à l'expliquer a posteriori.

Figure 58 : Image filmée par la caméra placée dans le simulateur lors de la passation des scénarios

Les données relevées par le simulateur à chaque temps de cycle concernent l'ensemble des paramètres liés à la vitesse (vitesse réalisée, vitesse imposée, vitesse de consigne instantanée,...) et aux actions sur le manipulateur.

Nous avons ainsi à disposition une trace de l'activité du conducteur et en particulier, les courbes des vitesses réalisées au cours des scénarios comme le montrent les exemples Figure 59 et Figure 60.

On peut d'ors et déjà constater, Figure 59, que le conducteur qui réalise ce scénario a su respecter les consignes données sur l'ensemble du scénario, sans dépassement de vitesse excessif, c'est-à-dire de plus de 5 km/h. Il apparaît néanmoins que le conducteur se rapproche beaucoup mieux des consignes de vitesse données en phase de freinage qu'en phase de traction.

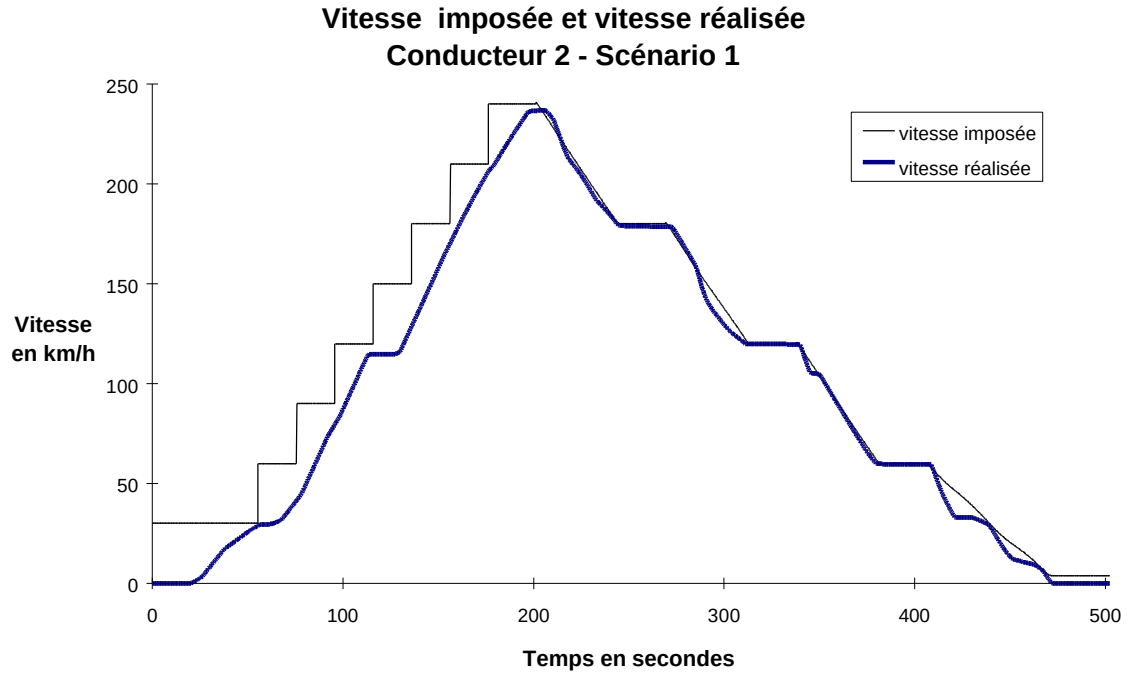


Figure 59: Courbes de vitesse imposée et de vitesse réalisée par le conducteur 2 - Scénario 1.

En fait, si les écarts entre la courbe de vitesse imposée et la courbe de vitesse réalisée sont plus importants en phase de traction, ceci est essentiellement lié aux performances de la machine. En effet, l'inertie des TGV est telle que lors de la montée en vitesse, même si l'on se place en traction maximale, le retard pris par rapport à la consigne est difficile à rattraper compte tenu des paliers de montée en vitesse demandés. Par contre en phase de freinage, le système de frein mis en place est plus performant et peut permettre de rattraper un éventuel retard au freinage puisque le conducteur est loin d'utiliser sa capacité de freinage maximale. Afin de pouvoir comparer les différentes situations rencontrées en mesurant des écarts liés au type de conduite du conducteur indépendamment des caractéristiques de la machine, nous avons donc pris en compte une donnée supplémentaire qui est le temps minimum requis par la machine pour atteindre les différentes consignes de vitesse en phase de traction. Ce temps minimum requis par la machine a été déduit des algorithmes informatiques qui permettent de simuler le comportement de la rame.

Lors du scénario 2, Figure 60, on constate ce même phénomène de retard par rapport aux consignes de traction. Ici, on peut observer lors des phases d'arrêts que le conducteur procède parfois en deux temps, puisqu'il stabilise légèrement sa vitesse juste avant l'arrêt définitif. Nous reviendrons ultérieurement sur ces phases d'arrêts.

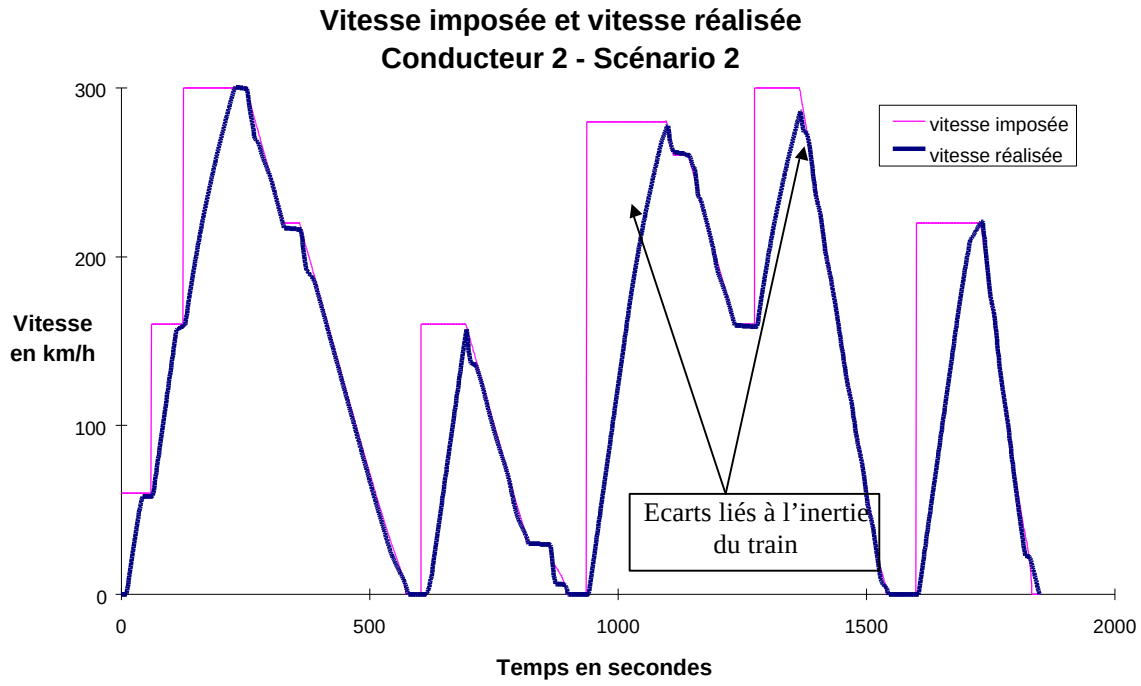


Figure 60: Courbes de vitesse imposée et de vitesse réalisée par le conducteur 2 - Scénario 2.

Ainsi, à l'aide de ces courbes, nous avons pu vérifier dans quelle mesure les conducteurs ont réussi à respecter les consignes de vitesse. Si la courbe de vitesse réalisée s'éloigne de manière trop importante de la courbe de vitesse imposée, nous visualisons la passation des scénarios sur le film afin de vérifier si les écarts entre la vitesse réelle et la vitesse imposée sont liés à l'utilisation et à la compréhension du manipulateur, à des erreurs d'interprétation de consignes ou à des fautes d'inattention par rapport à l'exercice demandé.

5.1.3 Résultats concernant l'utilisation du manipulateur de conduite

Ici, les membres du groupe projet ont tenu à vérifier que les conducteurs pourraient conduire en respectant de manière très stricte des consignes de vitesse évoluant constamment. En effet, compte tenu du nombre croissant de trains circulant sur lignes grande vitesse, les conducteurs verront fort probablement leur marge de manoeuvre se rétrécir concernant l'adaptation de leur vitesse.

Ainsi, nous avons demandé aux conducteurs lors de la passation des scénarios 1 et 2 d'atteindre les différentes plages de vitesse le plus rapidement possible. Nous avons retenu comme critère de performance spécifique à ces exercices, le temps mis par les Agents De Conduite (ADC) pour se placer dans les conditions de réalisation de la consigne (Tadc), c'est-à-dire le temps mis par les conducteurs pour ajuster leur demande d'effort de traction ou de freinage, à chaque changement de consigne.

Nous avons cherché à caractériser Tadc en fonction de différents critères liés aux caractéristiques du scénario et en fonction de l'essai réalisé, c'est-à-dire en fonction du jeu d'effort installé sur le manipulateur. Nous cherchons alors, dans quelle mesure les différentes variables influencent le critère de performance Tadc.

Nous avons donc relevé pour chaque conducteur, lors des 2 essais, le temps mis par le conducteur pour se placer dans les conditions de réalisation de la nouvelle consigne de vitesse : Tadc.

Tadc = Tc-Tm avec (Figure 61) :

Tc : le temps mis par le conducteur pour passer d'une plage de vitesse à une autre,

Tm : **en traction**, c'est le temps minimum réalisable pour passer d'une plage de vitesse à une autre, compte tenu des caractéristiques de la machine,
en freinage, c'est le temps indiqué par la courbe de décélération instantanée, pour passer d'une plage de vitesse à une autre (Figure 61).

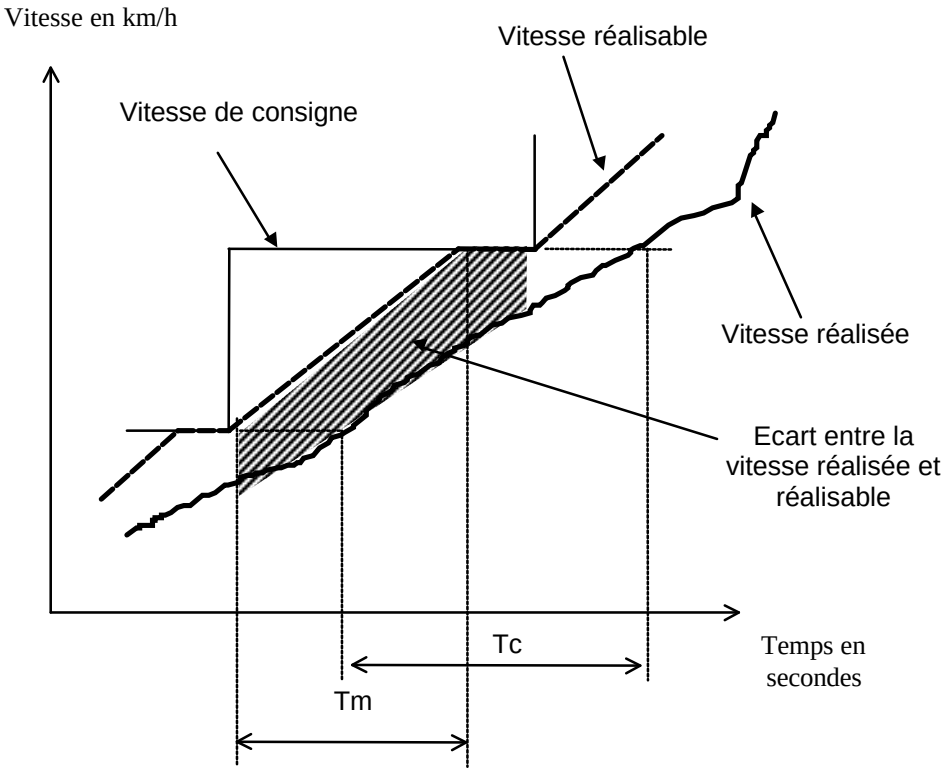


Figure 61: Variables temporelles liées aux courbes de vitesse

Pour chaque plage, nous avons cherché à caractériser Tadc en fonction des variables représentées Figure 62, que l'on peut décrire de la manière suivante :

Treac : est le temps mesuré entre l'apparition d'un nouvelle consigne du scénario (illustré Figure 56) et la première action menée par le conducteur pour réagir à cette consigne (manipulation ou consultation visuelle).

Naction : qui est le nombre d'actions menées durant Tc (dans notre exemple Figure 62 Naction = 5).

Ecart : qui est la valeur moyenne de l'écart entre la vitesse réalisée et la vitesse réalisable pour un palier donné (illustré Figure 61).

TRFR : qui indique si la consigne donnée au conducteur correspond à de la traction ou à du freinage (dans notre exemple, Figure 62, nous sommes en phase de traction).

Plage : qui caractérise la nouvelle plage de vitesse à atteindre donnée par la vitesse de consigne du scénario (Figure 56). Ici, Figure 62, la plage considérée est la plage [30-60].

Essai : qui indique le type d'effort mis en place sur le manipulateur (essai 1 : configuration d'efforts 1 ; essai 2 : configuration d'efforts 2).

Conducteur : qui caractérise le conducteur effectuant l'essai.

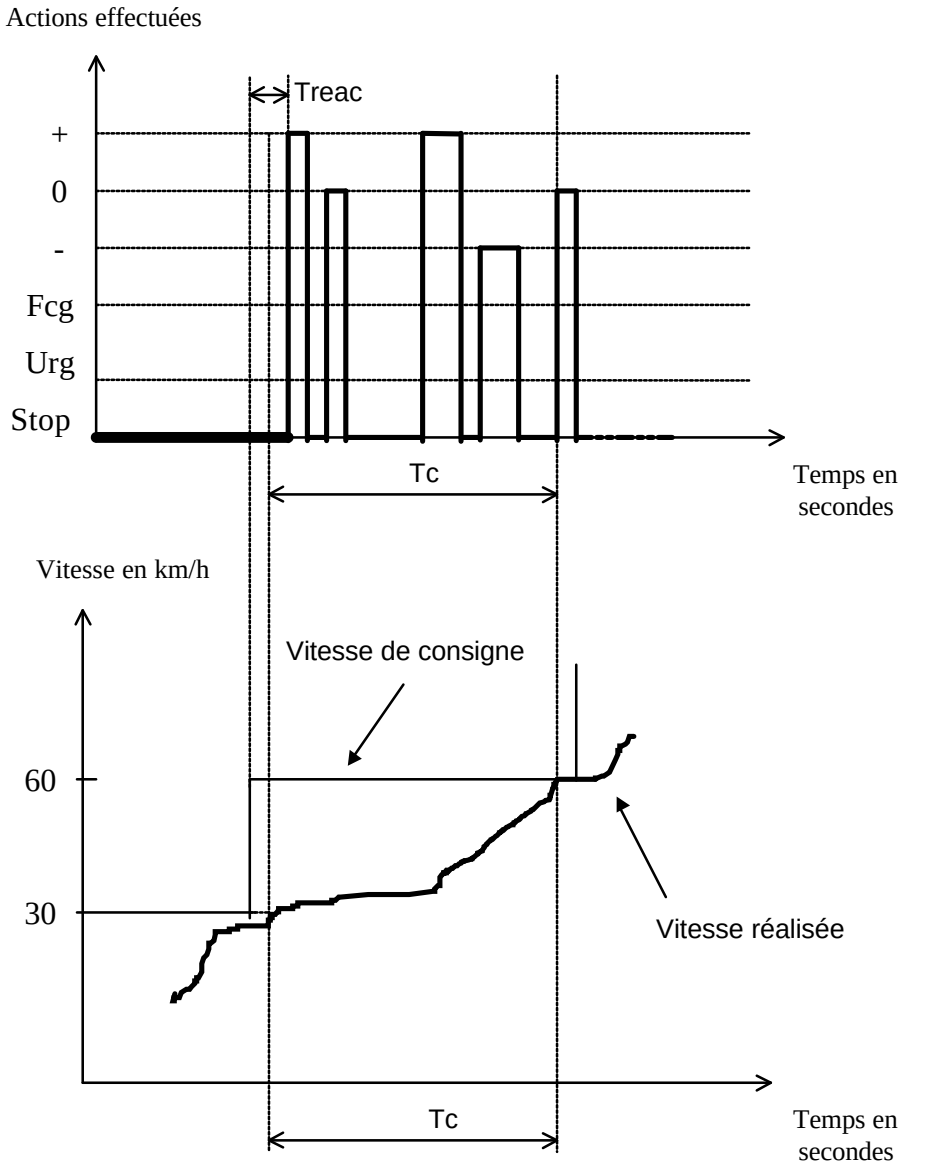


Figure 62 : Représentation des paramètres relevés pour l'évaluation de Tadc

A. Expression du temps mis par le conducteur pour se placer dans les conditions de réalisation des consignes de vitesse : Cas du scénario 1

Dans la mesure où nous avons pu constater Figure 59, que les conducteurs ont plus de facilité à se rapprocher de la courbe de vitesse de consigne lors de la phase de freinage, nous avons en premier lieu cherché à mettre en évidence l'effet des variables Conducteur, Plage, Passage et TRFR sur Tadc. Les résultats obtenus (Figure 63) traduisent une influence significative du type de situations rencontrées (traction ou freinage) sur Tadc : le temps mis par le conducteur pour se placer dans les conditions de réalisation de la nouvelle consigne de vitesse (*** : p<0.001). En effet, lors de la séquence de montée en vitesse (phase de traction), le temps Tadc moyen obtenu par l'ensemble des conducteurs est de 10,4 (?2,55) secondes, pour un temps Tadc en phase de freinage de 36,6 (?4,88) secondes. Il n'y a pas d'effet conducteur, plage et passage sur Tadc (NS).

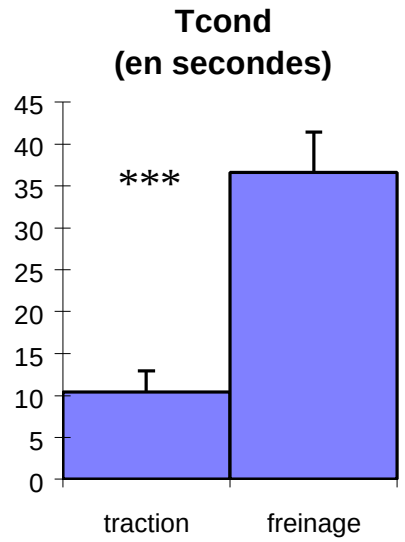


*Figure 63 :Résultats liés à l'analyse de variance, mettant en évidence l'effet de la variable TRFR sur Tadc, pour l'ensemble des conducteurs lors du scénario 1 (*** : p<0.001).*

Compte tenu de l'effet lié à la phase de traction et de freinage, nous avons choisi de distinguer, dans la suite des résultats, ces deux phases. Rappelons que nous cherchons ici à caractériser Tadc en fonctions des différents paramètres liés au scénario ou au type d'efforts installés sur le manipulateur, et ceci afin de déterminer dans quelle mesure ceux-ci vont influencer la performance liée à l'utilisation du manipulateur.

(i) Résultats liés à la phase de traction du scénario 1.

Nous avons réalisé une régression multiple permettant d'exprimer Tadc en fonction de l'ensemble des paramètres décrits ci-dessus : Essai, Conducteur, Plage, Treac, Naction. L'écart de vitesse n'a pas été retenu dans la mesure où celui-ci est directement dépendant de Tadc ainsi que de l'inertie du train. Les résultats de cette analyse (Tableau 5), montrent que Tadc ne dépend pas de la variable Essai (NS) et donc des efforts installés sur le manipulateur, ni de la variable Conducteur indiquant qu'il n'existe pas d'effet sujet.

	Variable dépendante : Tadc			
Paramètre	Estimation	Erreur standard	T	Valeur de p
Essai	2.31	2.19	1.06	NS
Conducteur	-0.42	0.37	-1.15	NS
Plage	-0.09	0.02	-4.14	p<0.001
Treac	0.59	0.25	2.32	p<0.05
Naction	1.12	0.24	4.67	p<0.001
Constante	9.03	5.75	1.59	NS

Tableau 5: Résultats de l'analyse en régression multiple recherchant l'effet de 5 paramètres sur Tadc pour l'ensemble des conducteurs (scénario 1, phase de traction).

Ces résultats nous permettent de conclure que dans nos conditions expérimentales, le temps Tadc, qui est le temps mis par les conducteurs pour se placer dans les conditions de réalisation de la consigne qui leur est indiquée, semble dépendre uniquement de la plage de vitesse dans laquelle ils se situent, du nombre d'actions qu'ils sont amenés à effectuer ainsi que du temps de réaction lié à la plage dans laquelle ils se trouvent.

Nous avons donc effectué une analyse de régression plus fine en vue de déterminer un modèle simplifié de la relation entre Tadc et les variables qui lui sont significativement liées (Tableau 6).

	Variable dépendante : Tadc			
Paramètre	Estimation	Erreur standard	T	Valeur de p
Plage	-0.09	0.02	-4.19	p<0.001
Treac	0.68	0.25	2.77	p<0.01
Naction	1.03	0.23	4.44	p<0.001
Constante	9.82	4.2	2.33	NS

Tableau 6: Résultats de l'analyse en régression multiple recherchant l'effet sur Tadc des paramètres significatifs retenus, pour l'ensemble des conducteurs (scénario 1, phase de traction).

Nous avons ainsi obtenu le modèle suivant, permettant de prédire la variable Tadc, pour l'ensemble des conducteurs lors de la phase de traction du scénario 1, en fonction de la plage de consigne où ils se situent, du temps de réactions associé à cette plage, et du nombre d'actions réalisées pour atteindre la nouvelle consigne.

$$Tadc = -0.09^{(?0.02)} * plage + 0.68^{(?0.25)} * Treac + 1.03^{(?0.23)} * Naction + 9.82^{(?4.2)}$$

Concernant la validité du modèle, nous nous appuyons sur l'analyse de variance lié à la régression multiple (Tableau 7), qui met en évidence que le modèle élaboré explique 60,48 % de la variabilité de Tadc (R^2=60.48).

Analyse de variance					
Origine	**somme des carrés**	**d.d.l**	**carré moyen**	**F**	**p**
Modèle	17050.1	3	5683.37	49.48	p<0.001 ***
Résidu	11141.0	97	114.856		
Total	28191.1	100			

Tableau 7 : Analyse de variance concernant la validité du modèle lié à la variable Tadc, pour l'ensemble des conducteurs (scénario 1, phase de traction).

La Figure 64 ci-dessous, permet d'apprécier graphiquement la validité du modèle, par la visualisation du nuage de point donné en abscisse par la valeur de Tadc du modèle et en ordonnée par la valeur de Tadc mesurée lors du scénario 1. La droite y=x serait la droite obtenue dans le cas où le modèle construit permettrait de retrouver de manière exacte l'ensemble des points observés.

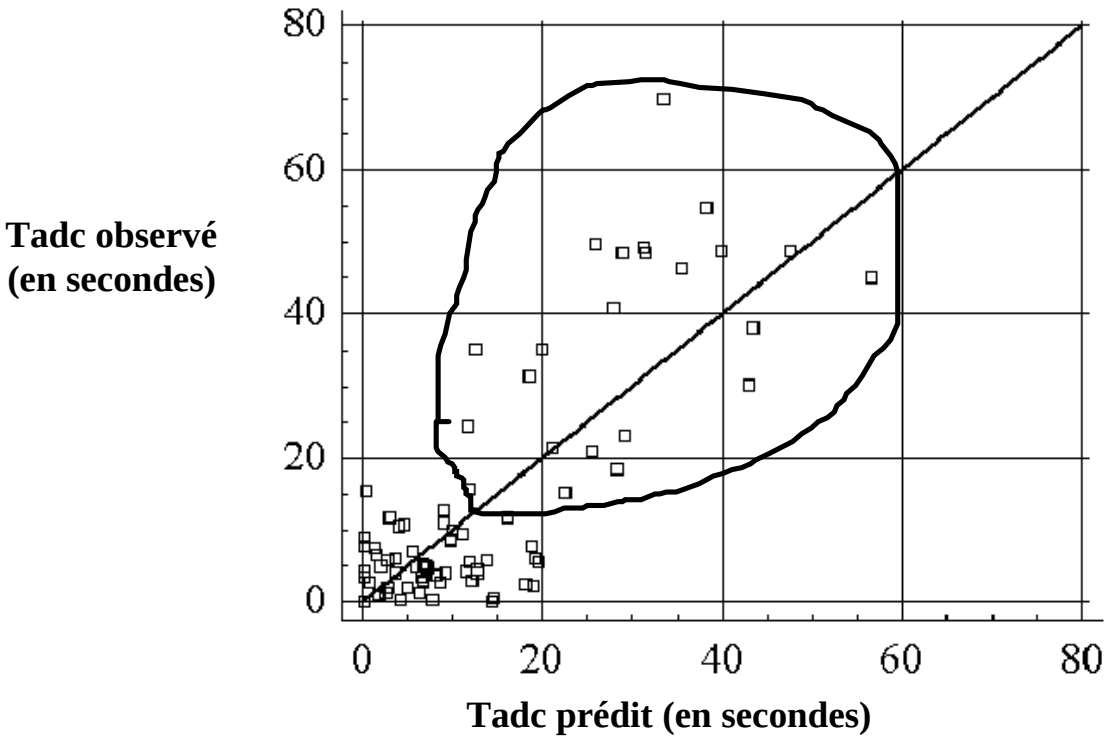


Figure 64 : Nuage de points donné en abscisse par la valeur de Tadc du modèle et en ordonnée par la valeur de Tadc mesurée (scénario 1, phase de traction).

On peut observer que seuls quelques points repérés dans la zone entourée, Figure 64, permettent de définir le modèle. En effet, la majeure partie des points forment un groupe très compact contenu dans la zone où Tadc est inférieur à 20 secondes.

Nous avons donc cherché ici, à déterminer la nature de ces points qui s'éloignent de la valeur Tadc =0, en examinant plus finement les caractéristiques des variables qui influencent Tadc. Nous avons ainsi effectué une analyse de variance (Figure 65 et Figure 66) sur les variables directement liées aux conducteurs (Treac et Naction), afin de chercher à comprendre le comportement des conducteurs.

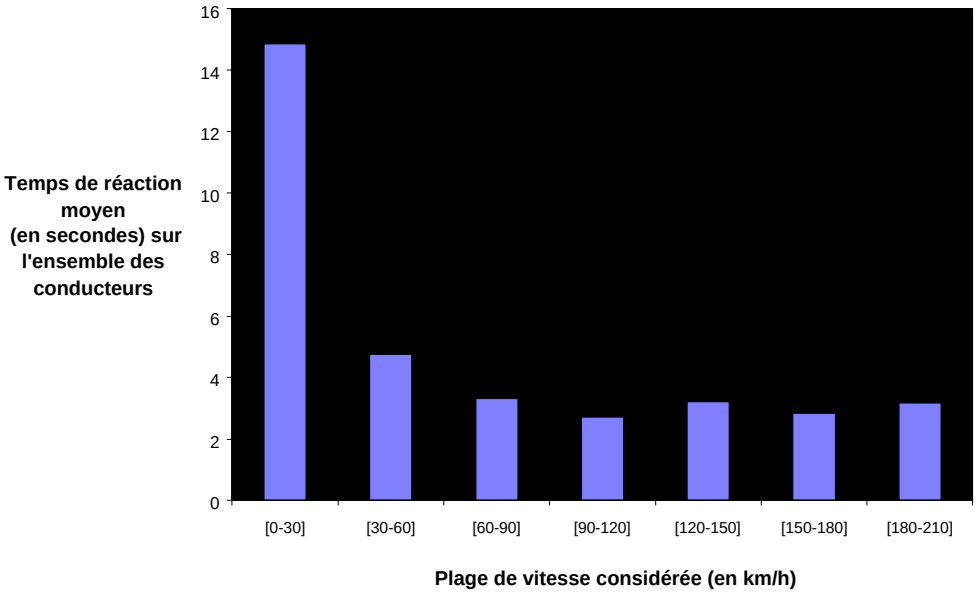


*Figure 65 : Moyenne des temps de réaction en fonctions des plages considérées pour l'ensemble des conducteurs (scénario 1, phase de traction). Analyse de variance (*** : p<0.001).*

L'analyse de variance nous a permis de mettre en évidence Figure 65, que le temps de réaction obtenu lors de la première plage de montée en vitesse allant de [0-30], est significativement différent de ceux obtenus dans les autres plages Le temps mis par le conducteur pour effectuer sa première action, suite à la consigne de départ, est pratiquement trois fois plus élevé que lorsqu'il s'agit d'un changement de consigne de vitesse.

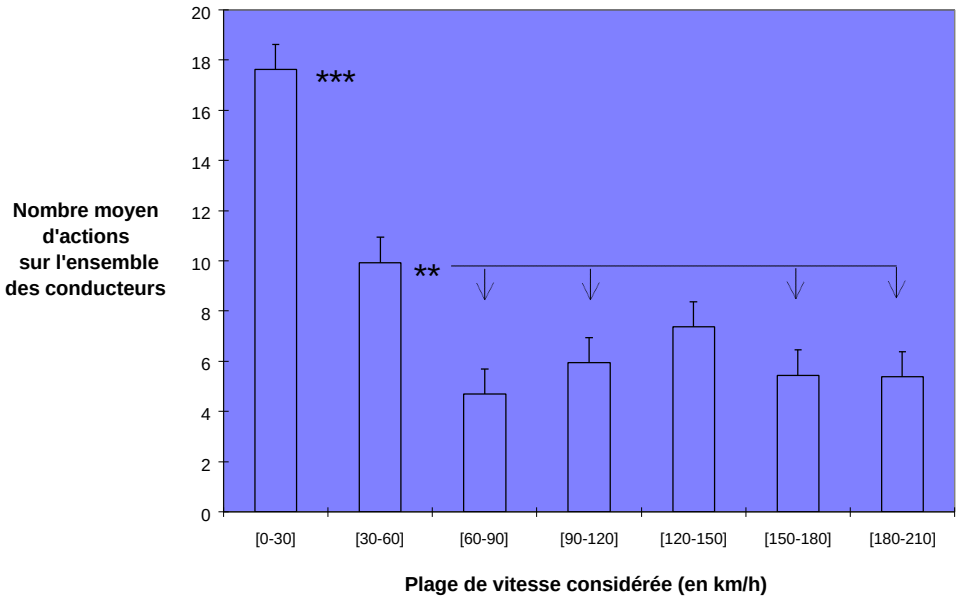


*Figure 66 : Nombre moyen d'actions en fonctions des plages considérée pour l'ensemble des conducteurs (scénario 1, phase de traction).Analyse de variance (*** : p<0.001 ; ** :p<0.01).*

La même analyse réalisée sur le nombre moyen d'actions menées par les conducteurs (Figure 66), met en évidence que l'effet plage concerne essentiellement les deux premières plages de montée en vitesse allant de [0 à 30] et de [30 à 60]. La plage [0-30] est significativement différente des autres plages (*** : p<0,001), tout comme la plage de [30-60] (*** : p<0,01). On peut remarquer que le nombre d'actions effectuées lors de la mise en mouvement qui fait suite à la consigne de départ, est trois fois plus élevé que lorsqu'il s'agit d'un changement de consigne de vitesse.

(ii) Résultats liés à la phase de freinage du scénario 1.

De la même manière que pour la phase de traction, nous avons réalisé une régression multiple pour chercher à exprimer Tadc en fonction des paramètres: Essai, Conducteur, Plage, Treac, Naction. Les résultats de cette analyse n'ont pas montré de relation entre ces différents paramètres, confirmant ainsi nos premières hypothèses concernant les différences existantes dans les stratégies adoptées, lors des phases de traction et de freinage.

Compte tenu des résultats obtenus lors de la phase de traction, nous avons souhaité effectuer pour chacune des variables liée au conducteur (Tadc, Naction et Treac), une analyse de variance en fonction des paramètres Essai, Plage et des conducteurs. Seul un effet plage a été trouvé concernant la variable Treac (** p<0.01).

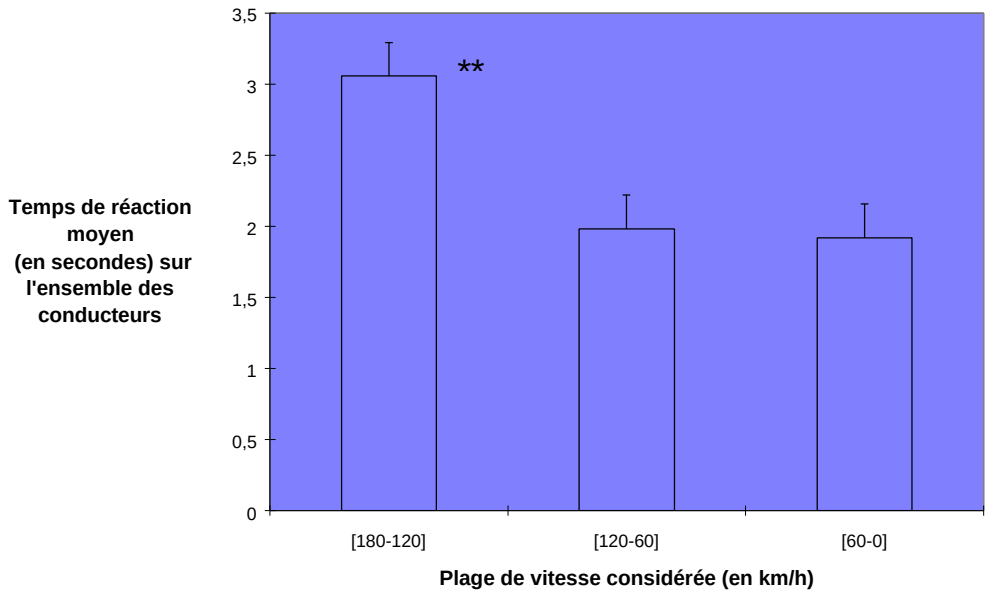


*Figure 67 : Moyenne des temps de réaction en fonctions des plages considérées pour l'ensemble des conducteurs (scénario 1, phase de freinage). Analyse de variance (** : p<0.01).*

Cet effet plage sur la variable Tréac (Figure 67), témoigne d'un temps moyen de réaction dans la plage de freinage [180-120], 1.5 fois plus élevé que dans les autres plages de freinage.

B. Expression du temps mis par le conducteur pour se placer dans les conditions de réalisation des consignes de vitesse : Cas du scénario 2

Compte tenu des premiers résultats obtenus concernant le scénario 1, nous avons choisi d'effecteur le même type d'analyse pour la première plage de montée et de descente en vitesse du scénario 2. Ce scénario présente une phase de montée en vitesse allant de 0 à 300 km/h, et une phase de freinage allant de 300 à 0 km/h selon des paliers de vitesse d'amplitudes variables. Nous avons donc cherché à identifier si l'on peut observer sur des paliers variables les mêmes phénomènes observés que lors du scénario 1. Comme précédemment, nous avons distingué dans nos analyses les phases de traction et de freinage, pour caractériser Tadc en fonction des autres facteurs retenus.

(i) Résultats liés à la phase de traction du scénario 2.

Nous avons réalisé une régression multiple permettant d'exprimer Tadc en fonction de l'ensemble des paramètres décrits précédemment : Essai, Conducteur, Plage, Treac, Naction. De la même manière que précédemment, l'analyse montre que Tadc dépend uniquement de la plage de vitesse dans laquelle le conducteur se situe, du nombre d'actions qu'il est amené à effectuer ainsi que du temps de réaction lié à la plage dans laquelle il se trouve. Nous avons donc effectué l'analyse de régression correspondante en vue de déterminer un modèle simplifié de la relation entre Tadc et les variables qui lui sont significativement liées (Tableau 8).

	Variable dépendante : Tadc			
Paramètre	Estimation	Erreur standard	T	Valeur de p
Plage	-0.05	0.02	-2.61	p<0.05
Treac	0.71	0.24	2.99	p<0.01
Naction	0.52	0.15	3.50	p<0.01
Constante	13.19	5.3	2.49	p<0.05

Tableau 8 : Résultats de l'analyse en régression multiple, recherchant l'effet sur Tadc des paramètres significatifs retenus, pour l'ensemble des conducteurs (scénario 2, phase de traction).

Nous avons ainsi obtenu le modèle suivant, permettant de prédire Tadc pour l'ensemble des conducteurs lors de la phase de traction du scénario 2, en fonction de la plage de consigne où

ils se situent, du temps de réactions associé à cette plage, et du nombre d'actions réalisées pour atteindre la nouvelle consigne.

$$Tadc = -0.05^{(?0.02)} * plage + 0.71^{(?0.24)} * Treac + 0.52^{(?0.15)} * Naction + 13.19^{(?5.3)}$$

Concernant la validité du modèle, nous nous appuyons sur l'analyse de variance (Tableau 9) lié à la régression multiple qui met en évidence que le modèle élaboré explique 68,48 % de la variabilité de Tadc (R^2=68.48).

Analyse de variance					
Origine	**somme des carrés**	**d.d.l**	**carré moyen**	**F**	**p**
Modèle	3738.90	3	1246.3	20.28	p<0.001 ***
Résidu	1720.36	28	61.4		
Total	5459.26	31			

Tableau 9: Analyse de variance concernant la validité du modèle lié à la variable Tadc , pour l'ensemble des conducteur (scénario 2, phase de traction).

La Figure 68 ci-dessous, permet d'apprécier graphiquement la validité du modèle, par la visualisation du nuage de point, donné en abscisse par la valeur de Tadc du modèle et en ordonnée par la valeur de Tadc mesurée lors du scénario 1. La droite y=x serait la droite obtenue dans le cas où le modèle construit permettrait de retrouver de manière exacte l'ensemble des points observés.

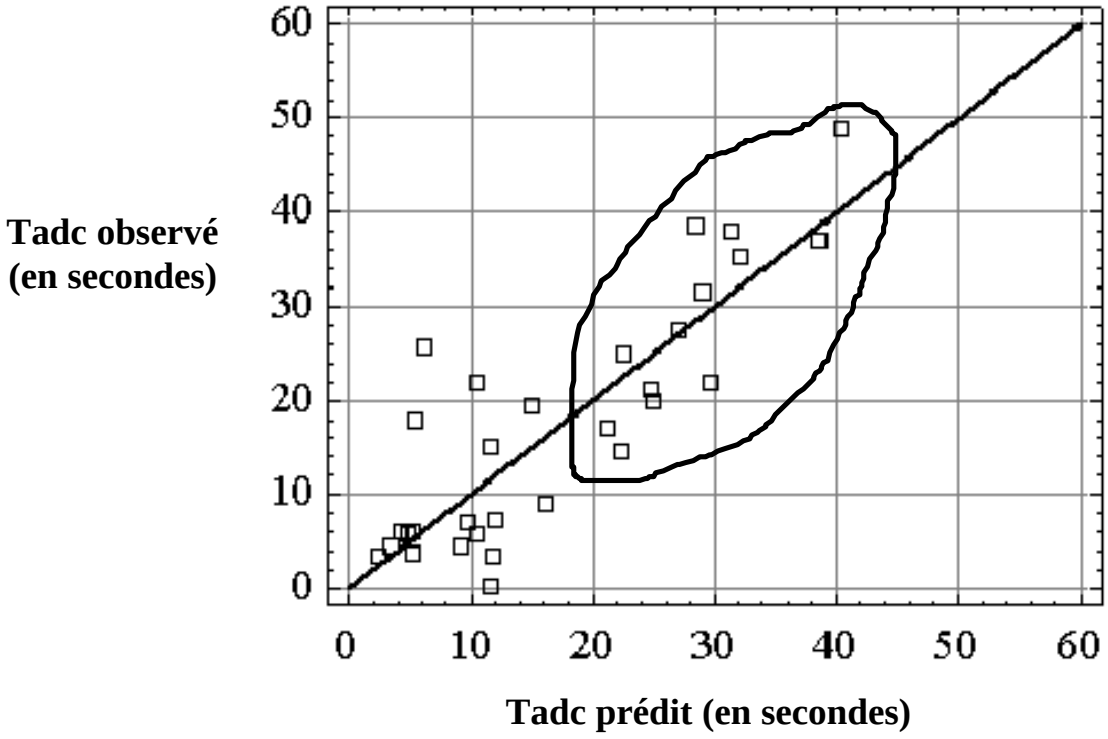


Figure 68 : Nuage de points donné en abscisse par la valeur de Tadc du modèle et en ordonnée par la valeur de Tadc mesurée (scénario 2, phase de traction).

Au cours de ce scénario 2, beaucoup moins de changements de consignes ont été donnés aux conducteurs, mais on peut observer Figure 68 que les quelques points représentant Tadc sont assez bien répartis le long de la droite y=x. On constate également que plus de la moitié des points se situent dans la zone où Tadc est inférieur à 20 secondes.

Nous avons donc cherché ici, à déterminer la nature des points qui s'éloignent de la valeur Tadc=0, en examinant plus finement les caractéristiques des variables qui influencent Tadc. Nous avons ainsi effectué une analyse de variance (Figure 69 et Figure 70) sur les variables directement liées aux conducteurs (Treac et Naction), afin de chercher à comprendre les comportements des conducteurs.

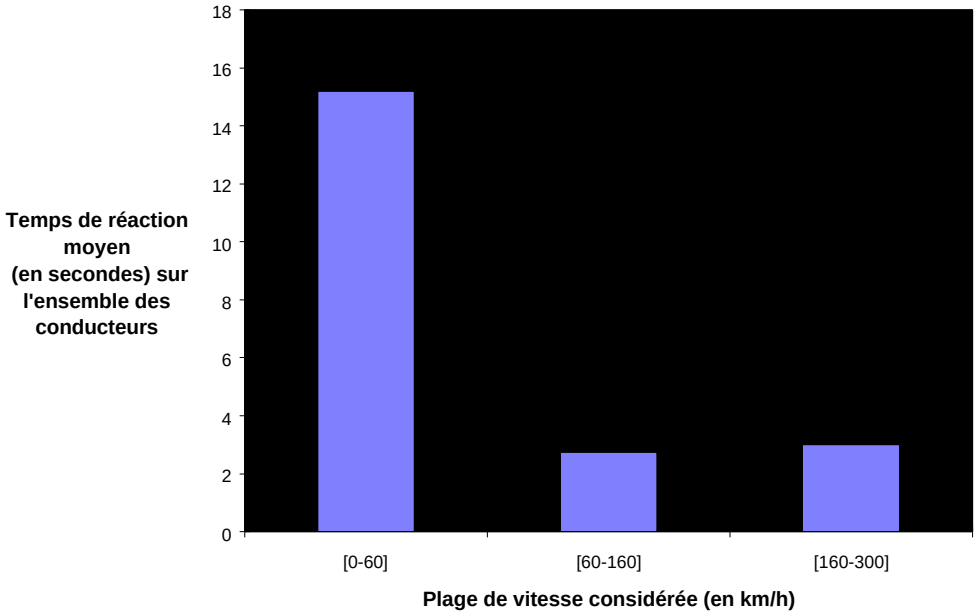


*Figure 69: Moyenne des temps de réaction en fonctions des plages considérées, pour l'ensemble des conducteurs (scénario 2, phase de traction). Analyse de variance (*** : p<0.001).*

L'analyse de variance nous a permis de mettre en évidence Figure 69, que le temps de réaction obtenu lors de la première plage de montée en vitesse allant de [0-60], est significativement différent de ceux obtenus dans les autres plages. Le temps mis par le conducteur pour effectuer sa première action suite à la consigne de départ est pratiquement cinq fois plus élevé que lorsqu'il s'agit d'un changement de consigne de vitesse.

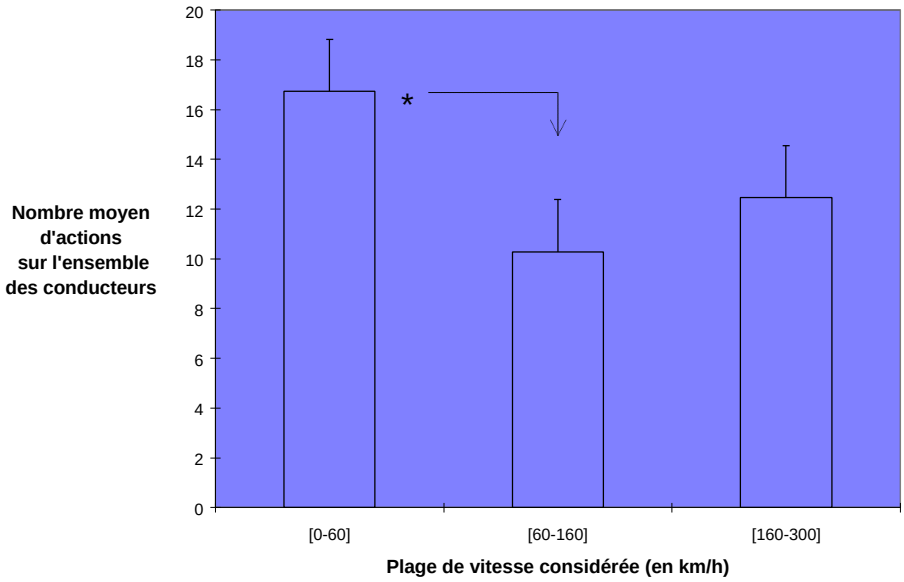


Figure 70 : Nombre moyen d'actions en fonctions des plages considérées, pour l'ensemble des conducteurs (scénario 2, phase de traction). Analyse de variance (: p<0.05).*

La même analyse réalisée sur le nombre moyen d'actions menées par les conducteurs (Figure 70), met en évidence que l'effet plage concerne essentiellement la première plage de montée en vitesse allant de [0 à 60], qui est différente de la plage de [60-160] (* : p<0,05). On peut remarquer que le nombre d'actions effectuées lors de la mise en mouvement, faisant suite à la consigne de départ, est plus élevé que lorsqu'il s'agit d'un changement de consigne de vitesse.

(ii) Résultats liés à la phase de freinage du scénario 2.

De la même manière que pour la phase de traction, nous avons réalisé une régression multiple pour chercher à exprimer Tadc en fonction des paramètres: Essai, Conducteur, Plage, Treac, Naction. Les résultats de cette analyse n'ont pas montré de relation entre ces différents paramètres, confirmant ainsi nos premières hypothèses concernant les différences dans les stratégies adoptées lors des phases de traction et de freinage.

Compte tenu des résultats obtenus lors de la phase de traction, nous avons souhaité effectuer pour chacune des variables liées aux conducteurs (Tadc, Naction et Treac), une analyse de variance en fonction des paramètres Essai, Plage et des conducteurs. Seul un effet plage a été trouvé concernant la variable Naction (*** p<0.001). Cet effet (Figure 71), témoigne d'un nombre d'actions important lors de la phase d'arrêt (plage de 220 à 0).

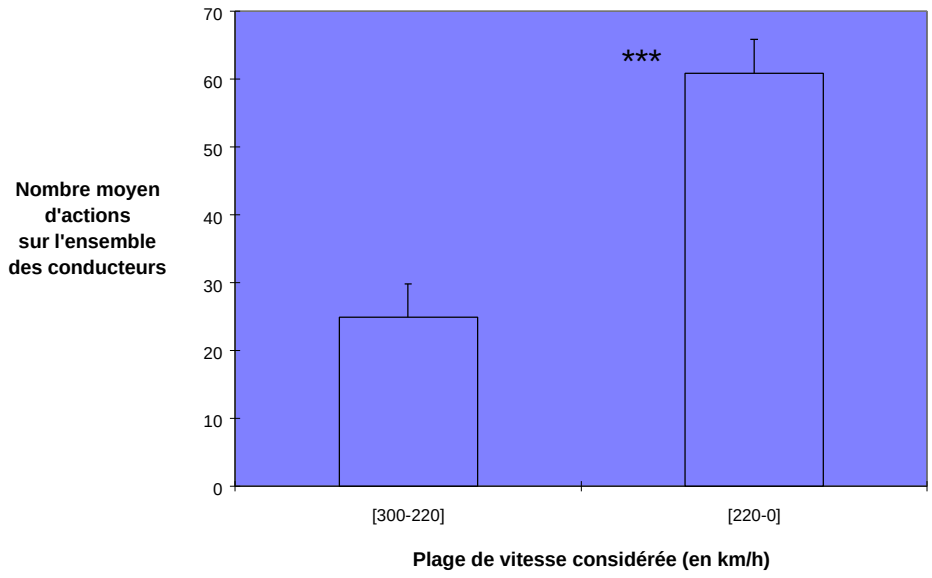


*Figure 71 : Nombre moyen d'actions en fonctions des plages considérées, pour l'ensemble des conducteurs (scénario 2, phase de freinage). Analyse de variance (*** : p<0.001).*

L'effet plage (Figure 71) sur la variable Naction, témoigne d'un nombre d'action deux fois plus élevé lors de la plage de freinage et d'arrêt [220-0], que lors de la première plage de ralentissement.

5.1.4 Discussion concernant l'utilisation du manipulateur de conduite

Lors de l'étape de définition des préconcepts, nous avons défini une maquette de la nouvelle commande de traction/freinage en respectant un certain nombre de normes ainsi que des critères relatifs au confort d'utilisation. Lors de cette étape d'évaluation intrinsèque du concept lié à la régulation de la vitesse, nous avons plus cherché à évaluer l'efficacité de cette nouvelle commande testée par les conducteurs dans un contexte de conduite simulé. Les évaluations ont été à la fois subjectives et objectives, puisque les conducteurs ont été amenés à effectuer des commentaires concernant l'utilisation de la commande et qu'au cours de simulations, nous avons pu relever un certain nombre de critères permettant de caractériser leur performance.

Ainsi, dès la première phase, nous avons recueilli les commentaires des conducteurs au cours des exercices réalisés sur le simulateur. Au travers de ces verbalisations, nous avons pu identifier qu'il n'existe pas de réel rejet du manipulateur impulsionnel, dans la mesure où les conducteurs comprennent facilement son fonctionnement dès qu'il est manipulé en situation. Les conducteurs pensent que leur manière de conduire ne sera pas modifiée par l'introduction du nouveau manipulateur sur le poste de conduite. Par ailleurs, ils n'ont pas identifié de stratégies spécifiques qui pourraient apparaître avec l'utilisation de ce type de manipulateur. La logique de fonctionnement adoptée pour la conception du manipulateur correspond aux attentes et aux stéréotypes des conducteurs (pousser vers l'avant pour tractionner et tirer vers soi pour freiner).

Les verbalisations des conducteurs concernant plus particulièrement les efforts à effectuer pour manipuler la commande, ont ici essentiellement porté sur l'expression d'un certain nombre de critères tels que la souplesse de la commande lors de sa manipulation sur les différentes positions (+ / - / 0 / Fcg / URG), la qualité des ajustements possibles, la précision. A l'issue de ces verbalisations, la configuration d'efforts 2 a été retenue comme permettant d'un point de vue subjectif, un meilleur contrôle de la régulation de la vitesse.

Concernant les résultats liés aux relevés effectués lors des simulations, le premier point à évoquer concerne le fait que l'on ne trouve pas de variations significatives des critères de performance retenus, en fonction du jeu d'efforts installé. On peut donc dire ici que l'effet de cette variable de conception sur la performance de régulation de la vitesse est négligeable devant les effets des autres variables étudiées. Néanmoins, les évaluations subjectives ont clairement montré une préférence concernant l'une des 2 configurations possibles. Ces données subjectives et objectives, nous ont ainsi permis d'orienter le choix final concernant les efforts de manipulation installés sur la commande, mais il faut souligner ici que le simple examen de la performance n'aurait pas suffit ici, à déterminer la meilleure configuration. Ainsi, il est nécessaire que la simulation ne serve pas uniquement à l'évaluation de la performance. En effet, comme le souligne BEGUIN et WEILL-FASSINA (1997), si la simulation renvoie aux processus de travail, à ses caractéristiques et à ses difficultés, la connaissance des opérateurs permet d'anticiper les orientations pertinentes pour la spécification du système technique futur.

Le deuxième point concernant nos résultats porte sur la différence de comportement observé entre les phases de traction et de freinage. En effet, il apparaît que pour la traction, plusieurs stratégies sont adoptées par les conducteurs même si les variations entre les sujets ne restent globalement qu'indicatives. Par contre, lors des phases de freinage, tout se passe comme si les conducteurs étaient conditionnés à utiliser le mode freinage de manière identique, puisque nous n'avons pas pu mettre en évidence au travers des analyses de variance d'effet sujet.

En examinant l'incidence des plages de traction ou de freinage lors d'une analyse de variance effectuées sur le critère Naction lors de la passation du scénario 1 (Figure 72), nous pouvons remarquer que de nombreux ajustements ont été effectués lors de la phase de freinage, indiquant qu'en terme de conception, la mise à disposition du mode de freinage pneumatique sur cette commande n'a pas eu d'effets négatifs sur son utilisation.

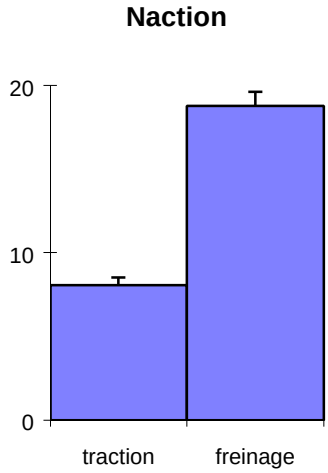


*Figure 72 :Résultats liés à l'analyse de variance, mettant en évidence l'effet de la variable TRFR sur Naction, pour l'ensemble des conducteurs lors du scénario 1 (*** : p<0.001).*

De la même manière, nous avons pu constater un bon niveau d'utilisation de la commande lors de la phase de freinage du scénario 2).

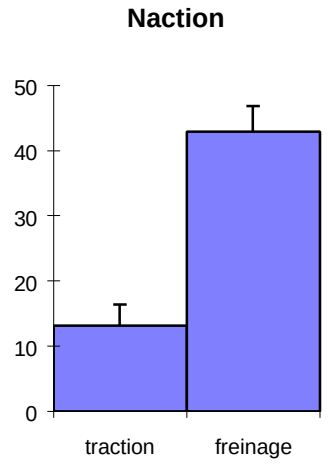


*Figure 73 :Résultats liés à l'analyse de variance, mettant en évidence l'effet de la variable TRFR sur Naction, pour l'ensemble des conducteurs lors du scénario 1 (*** : p<0.001).*

Lors de la passation des scénarios, nous avons pu constater que l'écart moyen pour l'ensemble des conducteurs entre la vitesse de consigne et la vitesse réalisée en phase de freinage, est plus faible qu'en phase de traction (Figure 74). Ceci s'explique par le fait que les phases de freinage sont directement liées à des aspects de sécurité au cours desquelles les conducteurs doivent parfaitement savoir maîtriser leur vitesse.

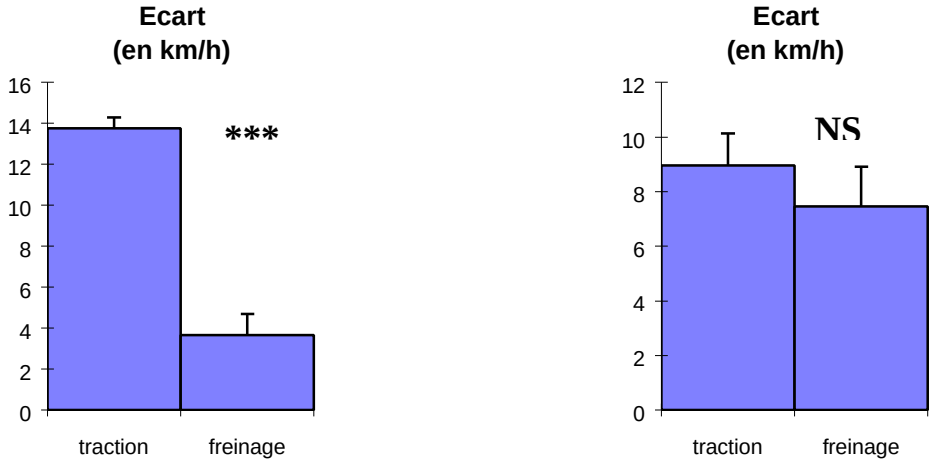


*Figure 74 :Résultats liés à l'analyse de variance, mettant en évidence l'effet de la variable TRFR sur Ecart, pour l'ensemble des conducteurs lors du scénario 1 et du scénario 2 (*** : p<0.001).*

Les écarts par rapport à la vitesse de consigne (Figure 74), mesurés lors des 2 scénarios, sont tout à fait acceptables compte tenu de la difficulté des scénarios et des marges de manoeuvre possibles. Ces écarts ont pu être expliqués par la visualisation des courbes de vitesse qui montrent que la plupart des conducteurs recevant une consigne de décélération, reprennent des habitudes de conduite qui avaient pu être identifiées lors de la phase d'étude du comportement de conduite des mécaniciens (BOLLON et coll., 1992), au détriment de la consigne du scénario qui stipule de respecter strictement les consignes indiquées. Ce point est plutôt positif, dans la mesure où l'on constate que le manipulateur permet aux conducteurs de reprendre leurs habitudes de conduite, même sur des scénarios ne reproduisant pas forcément des situations normales de conduite.

Nous avons donc pu mettre en évidence des performances tout à fait acceptables concernant l'utilisation du manipulateur, en terme de respect des vitesses de consigne et ceci pour des scénarios présentant un niveau de difficulté importante, du fait des nombreux changements de vitesse. Le nombre des actions à effectuer sur le manipulateur, même si il reste élevé, ne semble pas gêner les conducteurs qui apprécient la nouvelle manière de sélectionner les modes de traction et de freinage proposés, ainsi que la régulation fine par impulsions sur le manipulateur.

La mise en équation de Tadc ainsi que la mise en évidence de l'influence de la plage sur le temps de réaction et sur le nombre d'actions, nous a permis de montrer que l'effet plage

influence fortement l'utilisation du manipulateur. On constate en effet une différence très nette entre les phases de démarrage (plage de vitesse allant de 0 à 30 ou de 0 à 60), et les autres plages. Au cours de la phase d'étude du comportement de conduite des mécaniciens (BOLLON et coll., 1992), le groupe projet avait déjà pu valider que cette phase de démarrage est spécifique, dans la mesure où elle s'effectue en plusieurs étapes (au moins 2), afin de préserver le matériel et de ne pas provoquer un démarrage trop brusque. On peut donc également supposer ici que les conducteurs reproduisent des habitudes de conduites qui se traduisent dans les 2 scénarios par un temps de réaction et par un nombre d'actions qui sont significativement plus élevés dans les phases de démarrage.

Ainsi, cette expérimentation nous a permis de valider nos choix liés à la conception technique du manipulateur sur la base de l'examen de critères de performance retenus par le groupe projet. Comme le souligne VILLEMEUR (1988), le simulateur constitue ici une source de données précieuses, car il permet d'étudier des situations qui ne se sont jamais produites mais qui pourraient survenir, de maîtriser certains facteurs de performance, de réaliser une observation fine et enfin de connaître les éventuelles erreurs pouvant apparaître dans certaines situations d'utilisation.

Cependant, il nous reste à affiner nos résultats concernant l'utilisation du manipulateur en prenant en compte l'activité globalement menée par les conducteurs, qui n'apparaît pas au travers des critères de performance ici retenus. Des résultats complémentaires portant sur un autre type de scénario visant à réintroduire certains éléments de l'activité de conduite comme la surveillance des signaux sur la voie, donneront des informations supplémentaires à ce sujet, et en particulier sur l'utilisabilité du manipulateur de conduite et sur son intégration dans l'activité de conduite. Nous serons ainsi amenés par la suite à examiner les stratégies liées à l'utilisation du manipulateur, en détaillant le type d'actions effectuées, leur chronologie, ...

Il reste à vérifier si ces conditions sont également satisfaisantes en situation réelle et sur des parcours de plusieurs heures. La durée assez courte du scénario a permis aux conducteurs de maintenir une attention soutenue et de corriger rapidement les erreurs liées à un jeu d'efforts inadapté mais ne nous permet pas de conclure quant à un usage prolongé.

5.2 Détection d'informations visuelles

5.2.1 Objectifs

La présence de trois écrans sur le pupitre de conduite des rames des TGV futurs, a amené le groupe projet à se poser la question de la détection des informations visuelles. En effet, les conducteurs doivent principalement observer la signalisation extérieure et la voie lorsqu'ils se trouvent sur ligne classique. Il s'agit donc de vérifier que les écrans ne focalisent pas trop leur attention et à l'inverse, qu'une information en cabine soit bien détectée même si le conducteur surveille la signalisation sur la voie.

Ces inquiétudes s'expliquent principalement par le fait qu'aujourd'hui les conducteurs disposent d'une référence spatiale sur le manipulateur, qui leur permet d'estimer le niveau de traction où ils se placent. Avec le manipulateur impulsionnel, ce retour d'information n'existe plus et les conducteurs ont à consulter régulièrement l'interface visuelle de traction/freinage.

Il s'agit donc dans cette phase d'évaluer le principe de conduite avec 3 écrans, dans la mesure où les prises d'informations, concernant la signalisation extérieure sur la voie et les informations données en cabine, peuvent être fortement influencées.

5.2.2 Méthodes

A. Le scénario « cibles »

Il s'agit ici d'un scénario de conduite libre sur simulateur avec un support visuel permettant de recréer des conditions de conduite proches de la réalité. Nous avons en effet construit l'exercice, en faisant référence à une situation sur vidéodisque qui comporte de nombreuses informations de signalisation (feux, panneaux de limitation de vitesse,...). Nous avons choisi la ligne LENS/LILLE qui présente l'avantage d'être une ligne avec une forte densité d'agglomérations et donc de gares, ce qui implique une surveillance élevée de la voie. La consigne donnée aux conducteurs est de conduire en respectant les signaux présents sur la voie et d'effectuer deux arrêts en gare en respectant l'horaire donné par la fiche train.

B. Déroulement de l'expérimentation

Au cours du scénario, nous faisons apparaître aléatoirement sur les trois écrans des icônes lumineuses (cercles rouges de 1 cm de rayon) en faisant varier leur lieu d'apparition et l'intervalle de temps entre les différentes apparitions. Le conducteur doit alors indiquer verbalement s'il a perçu l'icône. Ce dispositif a pour objectif de mesurer la capacité attentionnelle restante, afin d'évaluer si la surveillance de trois écrans en conduisant ne surcharge pas de façon trop importante le canal visuel du conducteur, déjà sollicité par la surveillance de la voie.

Pour recréer l'exigence attentionnelle et visuelle qui sera présente dans la future cabine des TGV, nous avons également installé sur le troisième écran une tâche de détection d'icônes accompagnée d'indications (panne sol, panne engin,...), de manière à remplacer la tâche de détection des pannes qui sera installée sur ce troisième écran. Chaque conducteur doit restituer verbalement à la fin de la passation des scénarios, les items qu'il a mémorisés. Le scénario cibles dure environ 30 mn.

Cette expérimentation a été construite en s'inspirant de protocoles déjà existants concernant l'attention partagée lors de l'écoute de messages auditifs (CAMUS, 1996) et concernant les performances de détection visuelle des informations d'alerte dans des véhicules automobiles (LABIALE, 1991).

Les avis des conducteurs sur les interfaces sont recueillis à la fin de l'exercice pour mettre en évidence les différentes difficultés liées à la présentation de l'information qui n'ont pu être montrées en statique.

C. Les relevés

Concernant la présentation de l'information, nous relevons à la fin de la passation les items retenus ainsi que les avis des conducteurs sur les modalités de présentation de l'information. Lors du scénario « cibles », nous relevons les réponses des conducteurs et les éventuelles omissions ou erreurs effectuées. Nous avons relevé la vitesse réalisée par un conducteur durant le parcours (exemple Figure 75) afin de vérifier si les consignes données sont respectées (limitations de vitesse, respect des horaires lors des arrêts en gare,...).

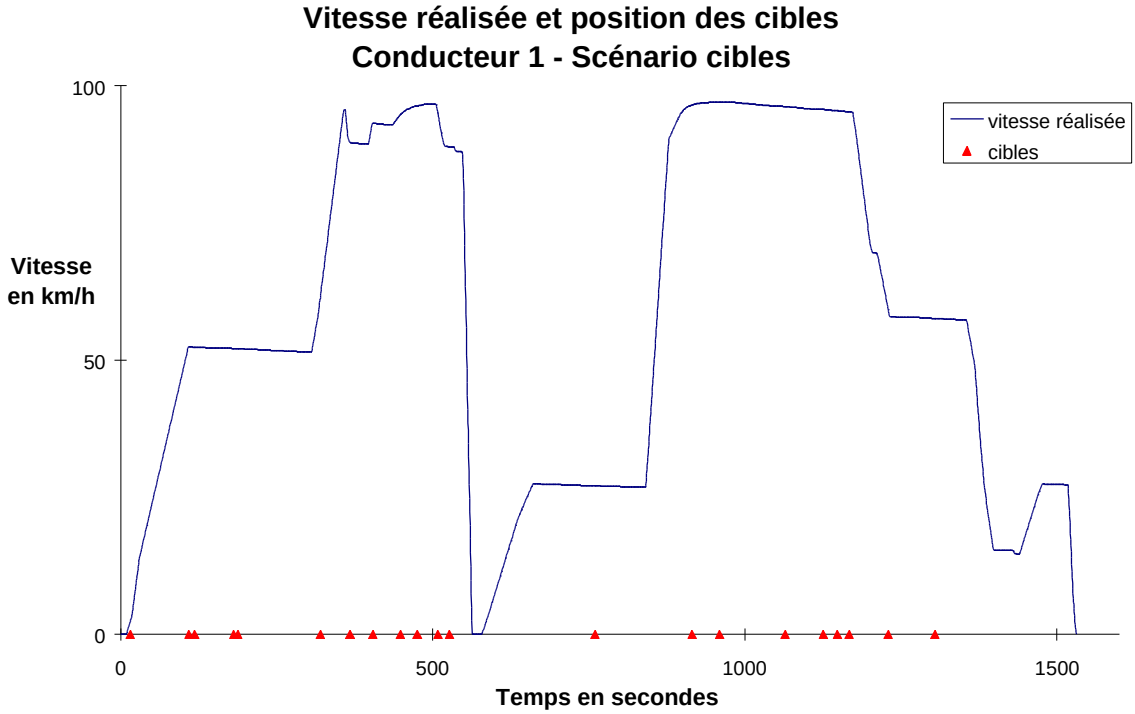


Figure 75 : Courbe de vitesse réalisée et apparition des cibles. Conducteur 1- scénario cibles.

Les différents tracés nous ont permis de vérifier qu'il n'y a pas eu durant ces scénarios, d'incidence notable sur tâche principale de conduite, liée à la détection de cible. L'ensemble des conducteurs a su réaliser le parcours en respectant les horaires donnés par la fiche train, sans dépasser les vitesses de consigne. Ainsi, le contrôle des écrans s'est déroulé sans que cela n'ait a priori d'incidence sur la tâche principale de régulation de la vitesse.

5.2.3 Résultats liés aux interfaces graphiques

Il apparaît ici que les conducteurs ont été capables de détecter toutes les cibles qui apparaissaient de façon aléatoire sur les différents écrans. Les résultats de l'exercice, qui consistait à mémoriser les items de l'écran de droite (panne sol, panne engin,...), sont donnés dans le *Tableau 10*.

SUJETS	Nombre d'items restitués	Nombre d'items corrects restitués	Nombre d'erreurs
1	10	10	0
2	5	5	0
3	6	6	0
4	5	5	0
5	12	9	3
6	9	8	1
7	9	7	2
8	10	10	0
9	7	7	0
10	8	8	0
11	9	8	1
12	7	6	1
Moyennes	8 (? 2.1)	7 (? 1.7)	

Tableau 10 : Résultats obtenus au test de mémorisation des items au cours du scénario cibles.

Ces résultats nous montrent que sur 10 items présentés les conducteurs sont capables d'en restituer en moyenne 7 sans erreur, ce qui correspond à l'empan mnémonique de la mémoire à court terme (LINDSAY et NORMAN, 1980).

5.2.4 Discussion concernant la détection des informations visuelles

Les premières évaluations, menées sur les interfaces visuelles statiques ou dynamiques, lors de la phase de définition des préconcepts, nous ont permis de valider dans une certaine mesure le contenu informationnel des écrans ainsi que l'agencement de ces informations au sein des écrans. Ici, nous avons plus cherché à vérifier que la performance liée à la détection de l'information est bonne, dans un contexte de conduite où l'attention du conducteur est fortement sollicitée.

Dans la mesure où toutes les informations qui sont apparues à l'écran ont été identifiées, et que le nombre de 7 (? 1.7) items corrects restitués correspond aux données de la littérature, nous pouvons conclure que dans la situation étudiée la charge attentionnelle liée à la surveillance des informations visuelles n'est pas trop importante. Ainsi, le test de détection des

cibles, nous a permis de montrer qu'en situation de conduite simulée, fortement surchargée par l'apparition d'informations visuelles sur les trois écrans, l'ensemble des informations est détecté par le conducteur. Nous ne pouvons pas cependant généraliser ce type de résultat à une situation de conduite dite classique. En effet, ici les conducteurs étaient avertis de l'apparition d'un grand nombre d'informations et donc ont su maintenir un niveau de vigilance élevé sur la durée du scénario. Il s'agira par la suite d'effectuer ce même type de démarche sur des parcours de plus longue durée, en situation de conduite réelle.

Il s'agit en effet de rester prudent quant à l'utilisation des zones informationnelles. En effet, comme le souligne LABIALE, (1991), il existe des zones privilégiées pour présenter certaines informations visuelles telles que les alertes. Mais l'installation durable dans le poste de conduite d'un système délivrant des signaux d'alertes ou d'alarmes trop fréquents peut influencer le niveau de vigilance et l'attention des conducteurs en situation réelle de conduite :
? Si l'occurrence de l'apparition du signal n'est pas trop fréquente ou trop rare, elle peut contribuer à la conservation voire à l'augmentation du niveau de vigilance des conducteurs.
? Par contre, si ces signaux se répètent alors qu'ils n'impliquent pas d'actions de la part des conducteurs, ceux-ci vont réduire leur niveau de vigilance et leur champ d'attention visuelle, laissant le soin aux automatismes de régler des situations qui peuvent conduire à des accidents.

Il faudra donc ici ne pas reproduire des erreurs commises par le passé, qui consistent à venir ajouter des informations visuelles non pertinentes au niveau du poste de conduite (et cela sera facilité par les écrans !), au fur et à mesure de l'installation des nouveaux dispositifs sur la locomotive. En effet, la performance liée à la détection de l'information pourra se dégrader rapidement si le système informationnel mis en place ne prend plus en compte la notion d'information utile au conducteur. Ainsi, d'un point de vue de la conception, nous pouvons conclure que les informations peuvent être présentées sur trois écrans sans risque de non détection, dans la mesure où le conducteur restera convaincu de la pertinence de ces informations, c'est-à-dire si ces informations lui sont réellement utiles.

Afin d'affiner nos résultats concernant le principe de conduite avec trois écrans, nous étudierons dans le chapitre suivant la répartition des directions regards lors de la phase de conduite libre. Nous essayerons ainsi d'identifier les nouvelles stratégies mises en place par les

conducteurs, liées à la détection de l'information visuelle, afin d'identifier si il existe un risque de non détection de l'information découlant des nouvelles stratégies adoptées.

5.3 Interprétation des alarmes sonores

5.3.1 Objectifs

Il s'agit ici d'établir un compromis sur les principes de solution à retenir concernant les informations sonores en cabine de conduite, liées à la régulation de la vitesse. En effet, les informations sonores permettent dans une certaine mesure de limiter la non détection d'informations visuelles données en cabine. Par contre, si les sons ne sont pas construits en adéquation avec l'activité qu'ils engendrent, ceux-ci peuvent s'avérer inefficaces et peuvent même provoquer des réactions contraires à la sécurité. Suite à la définition des différents sons lors de l'étape de définition des préconcepts, le groupe projet s'est posé la question de la validité de ces sons en relation avec l'activité de conduite. L'objectif ici est donc de mettre en évidence l'activité engendrée par le déclenchement de chaque information sonore en cabine et de valider les principes fonctionnels retenus.

Ainsi, dans cette expérimentation, les conducteurs sont donc amenés à interpréter et à réagir à une série d'alarmes sonores en situation de conduite simulée. Il s'agit plus ici de valider de nouvelles orientations en termes de solutions (alarme vocale, regroupement d'informations sous un même son,...) que de réellement retenir les caractéristiques définitives des sons futurs. Nous avons cependant en premier lieu proposé aux conducteurs différents préconcepts de sons, dans l'objectif de pouvoir orienter les études futures sur les alarmes en cabine de conduite.

5.3.2 Méthodes

A. Le scénario « son »

Afin de tester l'ensemble des alarmes sonores liées à la régulation de la vitesse, il nous a fallu mettre en place un scénario spécifique, présentant des situations de conduite critiques. Le scénario « son » a donc été construit en utilisant le vidéodisque du trajet Libourne-Bordeaux. Ce vidéodisque présente l'intérêt de faire apparaître plusieurs informations ou incidents tout au long du parcours pour lesquels une information sonore est activée. Les autres informations sonores ont été jouées en relation avec les informations données au niveau des interfaces graphiques du simulateur.

Ainsi, au cours du trajet, les conducteurs ont à effectuer ou à réagir à :

? 3 arrêts en gare
? un arrêt immédiat de faux départ
? 4 appels radio
? un franchissement de panneau P
? deux anomalies (panne sol et panne engin)
? une alarme voyageur en phase de conduite
? l'envoi d'une alerte radio causée par la présence d'un train arrêté sur la voie,
? la présence d'un tissu coincé sur une caténaire.

En fin de parcours, une plage est réservée au test de l'alerte de dépassement de vitesse, pour les conducteurs, qui n'ont pas déclenché cette alarme lors du déroulement du scénario.

B. Déroulement de l'expérimentation

Dans un premier temps, chaque conducteur sélectionne 12 sons dans la bibliothèque de sons créée lors de la phase de définition des préconcepts (**Tableau 3**), en relation avec leur expérience de la conduite. Ces sons sont ensuite installés sur le simulateur en vue d'être évalués cette fois-ci en phase de conduite simulée. Lors du scénario « son », les conducteurs ont pour consigne de respecter les vitesses et les horaires indiqués par la signalisation et par la fiche train. Ils ont également à réagir aux différents événements qui apparaissent, en fonction de la réglementation SNCF établie pour ces différentes situations.

C. Les relevés

Les remarques des conducteurs sont relevées au cours de l'entretien qu'ils ont individuellement lors du choix des sons, puis nous filmons la passation du scénario afin de laisser le conducteur libre lors de la phase de conduite. Une deuxième caméra est ici installée face au conducteur, afin de pouvoir effectuer le relevé de ses directions de regard au cours de la passation du scénario à l'aide du logiciel KRONOS

Au niveau du simulateur, nous enregistrons la vitesse réalisée, la vitesse de consigne et le moment de déclenchement des alarmes, dans l'objectif de vérifier s'il n'existe pas des perturbations liées à l'apparition des alarmes.

Les représentations de la vitesse imposée et de la vitesse réalisée (exemple Figure 76), nous ont permis de vérifier que chaque conducteur a effectué son parcours en respectant les consignes de vitesse ainsi que les arrêts en gare.

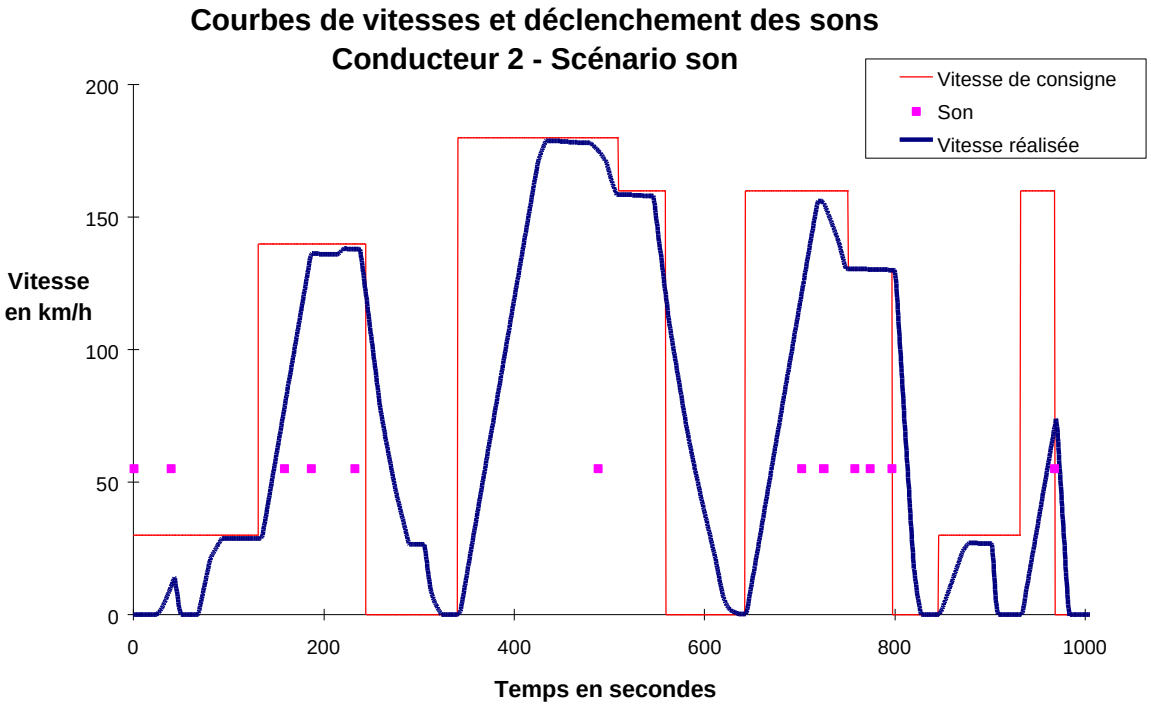


Figure 76 : Relevés effectués pour le conducteur 2, au cours du scénario son

Concernant les alarmes, nous les avons catégorisées en reprenant le classement établi avec les conducteurs, qui avait été validé par le groupe projet lors de la définition des préconcepts. En effet, les divers entretiens avec les conducteurs ainsi que l'ensemble des informations concernant les alarmes ont fait ressortir quatre catégories principales d'informations sonores : les catégories Indications, Consigne, Alerte et Urgence.

- **1 Indication : Les informations sonores liées à des indications :** panne sol, panne engin et appel d'attention radio.
- **2 Consigne : Les informations sonores liées aux changements de consignes de conduite :** bip de répétition des signaux (ou RSO), effacement du b en phase de conduite normale, autorisation de départ en gare.
- **3 Alerte : Les informations sonores liées au non-respect d'une consigne :** alerte vitesse, son vacma, alarme voyageur en phase de conduite normale
- **4 Urgence : Les informations sonores indiquant un danger ou un accident :** alerte radio, alarme voyageur et faux départ en phase de conduite à risque c'est-à-dire en gare.

Afin de pouvoir vérifier la cohérence de l'activité réalisée lors du déclenchement des alarmes, nous relevons pour chaque catégorie, le temps mis pour effectuer l'action induite par l'alarme sonore et le temps mis, soit pour consulter la zone d'information liée à l'alarme, soit pour contrôler l'action engendrée.

5.3.3 Résultats liés aux interfaces sonores

A. Choix des modes de présentation et des sons

Le Tableau 11 regroupe les principes de solutions convenant le mieux aux douze conducteurs qui ont effectué le test d'écoute des différents préconcepts de sons. Ainsi, pour chaque son retenu, ils ont choisi si l'information doit être donnée en vocale ou sous forme d'un son, si une information visuelle redondante doit être donnée parallèlement au déclenchement de l'information sonore et ils ont déterminé le contenu du message à associer à l'information.

Information sonore concernée	Type	Information visuelle redondante	Message associé
Alerte radio	son	oui	Arrêt d'urgence
Alarme voyageur(départ)	son	oui	Arrêt d'urgence
Faux départ	son	oui	Arrêt d'urgence
Alerte dépassement vitesse	son	oui	1. Vitesse dépassée 2. Risque de prise en charge
Alarme voyageur (conduite)	Vocale	oui	« Alarme voyageur »
Signal de départ	Vocale	oui	« Départ »
Effacement du b KVB	Bip + Vocale	oui	«Vitesse 160 »
Signal d'anomalie	Vocale	oui	« Consultez le GDI »
Appel d'attention radio	son	oui	Appel radio
Répétition des signaux voie	son	non	
Son VACMA	son	non	
Emission alerte radio	Vocale	oui	«Emission alerte radio»

Tableau 11 : Principes de solutions retenus par les douze ADC, concernant chacun des sons étudiés.

Soulignons ici, que les principes nouveaux en termes de sons en cabine de conduite ont été bien acceptés. On peut, en effet, remarquer une acceptation très nette de la présentation des informations sous forme vocale, qui apporterait selon les conducteurs un confort en terme de mémorisation des alarmes. Cependant, plusieurs conducteurs souhaitent que ces messages donnés sous forme vocale, soient précédés d'un son identique aux sons actuels, afin de ne pas reconstituer un système sonore totalement différent de celui existant.

B. Evaluation en phase de conduite simulée des sons retenus

Nous avons pu vérifier qu'il n'existait pas de perturbations dans le déroulement des scénarios lors du déclenchement des informations sonores liées à des indications (catégorie 1), qui n'engendrent pas nécessairement une action ou une consultation visuelle d'informations.

Pour les catégories 2,3 et 4 d'alarmes sonores liées à la régulation de la vitesse, nous avons examiné les actions réellement menées par les conducteurs suite à leur déclenchement. Nous avons ainsi cherché à montrer que pour chacune des catégories d'informations sonores, les caractéristiques liées au son induisent une réaction des conducteurs allant dans le sens de ce pour quoi l'alarme a été conçue : renseigner, informer, alerter,...

Nous avons donc effectué une analyse de variance à plusieurs niveaux, afin de mettre en évidence les effets des variables conducteur et catégorie de l'alarme sur le temps mis pour réaliser l'action, sur le temps mis pour consulter l'information visuelle ainsi que sur l'écart entre le temps mis pour la consultation visuelle de l'information et le temps mis pour réaliser l'action. Ce sont ces indicateurs, validés par le groupe projet, qui vont permettre de caractériser l'action engendrée par le déclenchement de l'alarme.

Concernant le temps mis pour réaliser l'action, l'analyse de variance démontre un effet catégorie de l'information fortement significatif (*** : $p<0.001$), qui différencie les catégories 2 et 4, et un effet indicatif (* : $p<0.05$), qui différencie les catégories 3 et 4 (Figure 77). Il n'y a pas d'effet conducteur (NS).

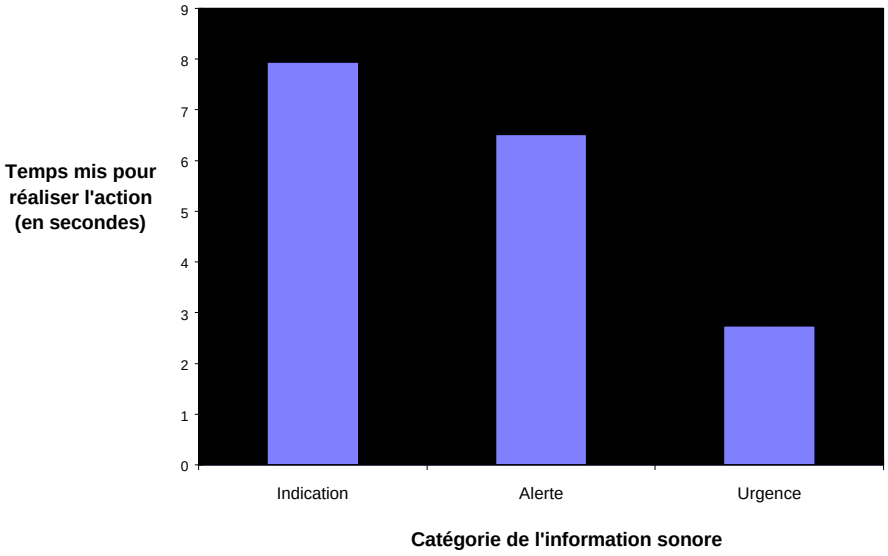


Figure 77 : Temps moyen mis pour réaliser l'action attendue en fonction de la catégorie d'alarme considérée, pour l'ensemble des conducteurs, (scénario « son »).
*Analyse de variance (*** : p<0.001 ; * :p<0.05).*

Concernant le temps mis pour consulter l'information visuelle, l'analyse de variance démontre un effet catégorie de l'information indicatif (* : p<0.05), qui différencie les catégories 2 et 4 (Figure 78). Il n'y a pas d'effet conducteur (NS).

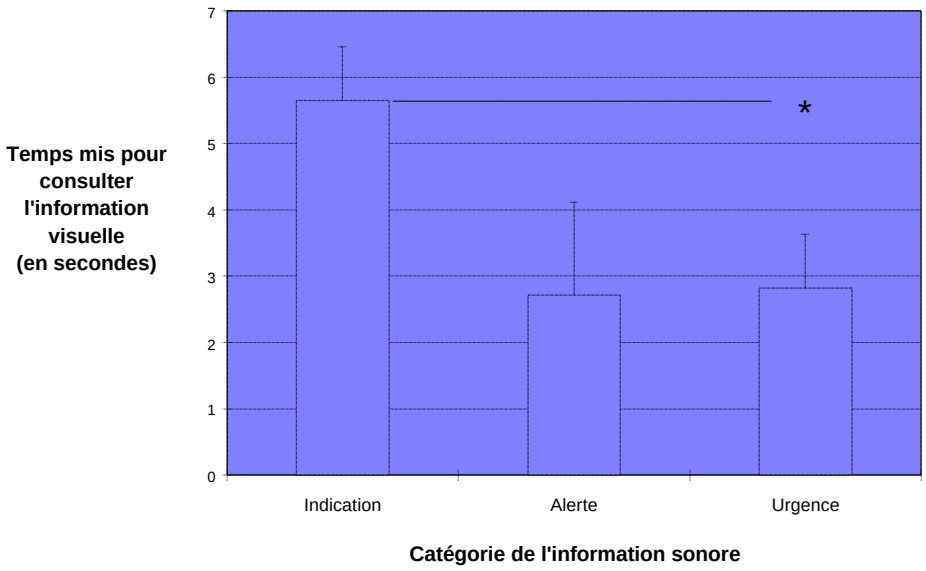


Figure 78 : Temps moyen mis pour consulter l'information visuelle en fonction de la catégorie d'alarme considérée, pour l'ensemble des conducteurs, (scénario « son »).
*Analyse de variance (* :p<0.05).*

Concernant l'écart entre le temps mis pour consulter l'information visuelle et le temps mis pour réaliser l'action, l'analyse de variance (Figure 79) démontre un effet catégorie fortement significatif (*** : p<0.001), qui différencie les catégories 3 et 4, et un effet indicatif (* : p<0.05), qui différencie la catégorie 2 des autres catégories. Il n'y a pas d'effet conducteur (NS).

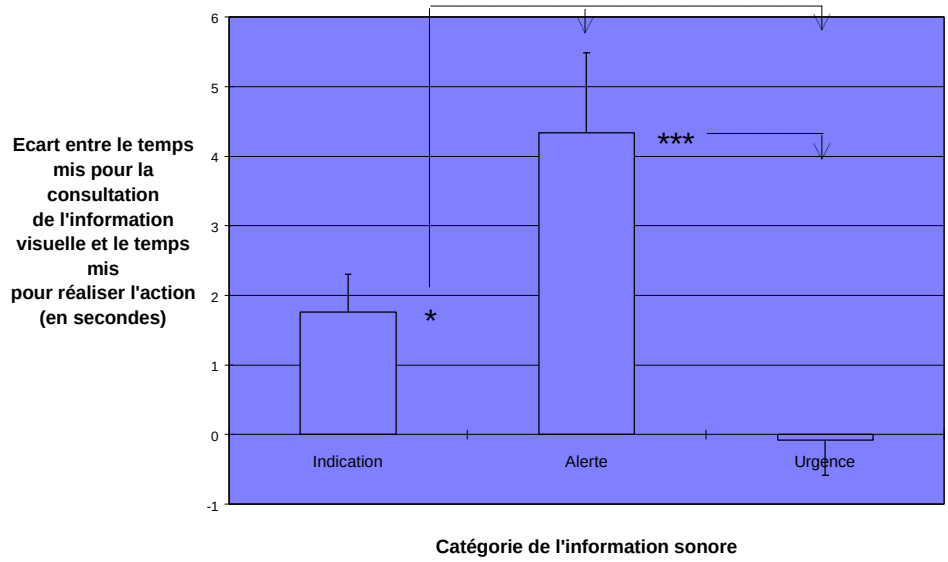


*Figure 79 : Ecart moyen entre le temps mis pour consulter l'information visuelle et le temps mis pour réaliser l'action, en fonction de la catégorie d'alarme considérée, pour l'ensemble des conducteurs, (scénario « son »). Analyse de variance (*** : p<0.001 ; * : p<0.05).*

Ces différents résultats nous permettent de vérifier que les catégories qui ont été constituées avec les nouvelles informations sonores, se distinguent de manière significative lorsque l'on examine les temps de réaction des conducteurs.

5.3.4 Discussion concernant l'interprétation des alarmes sonores

Lors de l'évaluation subjective des informations sonores, nous avons pu constater qu'il était parfois difficile pour les conducteurs de prendre position et surtout d'effectuer le choix d'un son. Ces conducteurs ont alors fait remarqué que cette évaluation devrait se faire à plus grande échelle, voire avec des conducteurs étrangers et tenir compte par la suite des ambiances sonores de tous les types de machines, françaises et étrangères. Ces évaluations nous ont cependant permis d'effectuer la validation des principes fonctionnels concernant chacun des sons.

L'évaluation des informations sonores liées à la régulation de la vitesse en contexte de conduite simulée,nous a permis de confirmer et d'affiner ces premiers résultats, en vérifiant que les catégories de sons que nous avons constituées en relation avec l'activité de conduite sont cohérentes. En effet, nous avons pu vérifier ici la cohérence des actions engendrées, suite au déclenchement des alarmes qui constituent les différentes catégories. Nous avons ainsi montré que :

? la catégorie 4 est caractérisée par un temps mis pour consulter l'information 2.8 (?0.8) secondes, par un temps de réalisation de l'action de 2.7 (?0.8) secondes et donc par une réaction quasi simultanée entre la prise d'information et l'action menée. Ceci semble cohérent dans la mesure où sont regroupées dans cette catégorie les informations sonores indiquant un danger ou un accident et qui nécessitent une action immédiate,

? la catégorie 3 est caractérisée par un temps mis pour consulter l'information de 2.7 (?1.4) secondes, par un temps de réalisation de l'action de 6.5 (?1.7) secondes et par un écart de 4.3 (?1.1) secondes entre les moments où l'information est consultée et où l'action est réalisée. Ici, le conducteur est pris en défaut puisque les informations sonores de la catégorie 3 sont liées au non-respect d'une consigne. On peut supposer qu'il vérifie bien la cause du déclenchement de l'alarme avant d'effectuer la moindre action dans la mesure où, une nouvelle erreur d'appréciation pourrait le conduire à dépasser la limite donnée par la consigne,

? la catégorie 2 est caractérisée par un temps mis pour consulter l'information de 5.7 (?0.8) secondes, par un temps de réalisation de l'action de 7.9 (?0.8) secondes et par un écart de 1.8 (?0.5) secondes entre les moments où l'information est consultée et où l'action est réalisée. Ici, les informations sonores sont liées aux changements des consignes de conduite qui même si elles induisent forcément une action, n'impliquent pas une réaction immédiate.

L'hypothèse de départ, qui consiste à dire que les indicateurs de performance retenus liés à l'activité faisant suite au déclenchement d'une alarme sonore, sont influencés par les caractéristiques des alarmes et leur degré d'urgence (HAAS et CASALI., 1995), a été vérifiée. Le groupe projet a ainsi pu valider ici les principes fonctionnels, au regard des critères de performance retenus concernant les temps de réaction des conducteurs (ZWOLINSKI et SAGOT, 1998).

Mais tous les conducteurs ont tenu à souligner le fait que l'évaluation a été faite dans de bonnes conditions de fonctionnement de toutes les installations et en particulier avec une bonne intelligibilité des messages donnés en vocal. Il s'agira donc par la suite d'effectuer à nouveau ces évaluations avec les systèmes techniques retenus, dans la mesure où un doute subsiste quant à la qualité de la reproduction des sons sur des appareils de série.

De plus, d'autres critères de performance devront être retenus et il s'agira par la suite d'examiner plus finement les résultats obtenus en considérant l'activité globale menée essentiellement concernant la redondance des signaux visuels et sonores. En effet, la redondance des données apporte au conducteur sur le plan fonctionnel la possibilité de choisir un mode de présentation en accord avec la situation rencontrée (ex : affichage précis ou témoin d'alerte). Cette redondance des signaux permet également l'installation de la confiance chez l'opérateur (VALOT et AMALBERTI, 1989). Cependant certaines erreurs ont pu être détectées sur le terrain, liées à la redondance de données au moment du départ des trains (HAGA, 1984). Bien souvent ces erreurs proviennent de l'automaticité du traitement de l'information et de « la négligence attentionnelle du signal ». Il faut donc examiner plus finement l'activité qui résulte de ce principe de redondance, qui a été fréquemment retenu, et qui peut dans certaines situations masquer l'information principale. Dans la mesure où lors de certaines tâches, le choix du mode de présentation de l'information a une influence sur le comportement (LIEURY et CHOUKROUN, 1985), différentes évaluations devront ainsi être menées mais cette fois-ci sur le terrain une fois l'ensemble des critères techniques définis (ROBINSON et EBERTS, 1987).

5.4 Conclusion sur cette étape d'évaluation intrinsèque du concept lié à la régulation de la vitesse en situation de conduite simulée

Lors de cette étape d'évaluation intrinsèque du concept lié à la régulation de la vitesse, nous avons testé les maquettes des dispositifs au travers de l'examen de certains **critères de performance**. Cette philosophie de simulation conduit généralement à juger de l'efficacité des maquettes mises en place, soit en comparant les performances observées dans différentes situations en faisant varier leurs paramètres, soit en comparant la performance observée avec une performance attendue (BEGUIN et WEILL-FASSINA,1997).

Dans notre cas, il n'a pas été possible de comparer les performances obtenues avec le nouveau concept, aux performances obtenues avec les anciens concepts. En effet, dans un premier temps, nous pensions pouvoir installer sur le simulateur, l'ensemble des dispositifs actuels liés à la régulation de la vitesse, afin de pouvoir comparer les performances obtenues dans les mêmes conditions simulées, mais ceci n'a pas été possible pour des raisons techniques. Nous avons donc effectué des **évaluations comparatives** sur simulateur concernant les différents préconcepts en prenant comme référence les **performances attendues** qui ont été déterminées au cours de la **définition du champ des activités futures souhaitables.**

Cette phase d'évaluation a permis au groupe projet d'optimiser et de valider certains aspects du concept lié à la régulation de la vitesse. Ceci a été rendu possible sur la base de l'examen de critères de performance spécifiques, étudiés lors de la passation de **scénarios imposés**, reproduisant certaines conditions d'exercice de l'activité. Ces scénarios ont été mis en place afin de pouvoir évaluer le concept lié à la régulation de la vitesse de manière intrinsèque, c'est-à-dire en examinant des points particuliers concernant son utilisation, tout en reproduisant l'ensemble des interactions existantes entre les éléments qui le composent. La difficulté des scénarios imposés a permis de tester chacun des dispositifs dans des situations extrêmes d'utilisation, ce qui a permis de valider l'adéquation entre la tâche future à réaliser et les outils mis à la disposition des conducteurs pour réaliser cette tâche.

La participation des conducteurs a permis de recueillir des données sur la conduite d'experts et d'avoir l'avis des conducteurs sur les nouveaux dispositifs. Cette phase a en particulier,

permis de retenir un jeu d'efforts sur le manipulateur et d'examiner son utilisation. Concernant les écrans, on a commencé à valider le principe de conduite avec trois écrans en terme de détection de l'information. En effet, la capacité attentionnelle des conducteurs ne semble pas saturée à la vue des résultats des tests de détection de cibles et de mémorisation de différents items, qui montrent des bonnes performances pour l'ensemble des conducteurs. Concernant les sons, on a pu vérifier l'adéquation des sons retenus avec les activités qui en découlent.

Ici, nous avons essentiellement utilisé la simulation en centrant nos évaluations sur l'efficience et la performance du système conducteur/concept lié à la régulation de la vitesse. Nous avons recréé des situations de conduite très exigeantes en termes de tâches à effectuer, afin de voir si les conducteurs sont capables d'atteindre les objectifs fixés en utilisant les nouveaux outils lors de situation de conduite perturbée.

Mais comme le souligne BEGUIN et WEILL-FASSINA (1997), une autre approche doit également être utilisée. En effet, la simulation doit davantage permettre aux concepteurs de **s'intéresser à l'activité globale des opérateurs**, la compréhension de cette dernière étant considérée comme nécessaire pour optimiser le fonctionnement du système. Il s'agit donc maintenant d'évaluer l'utilisabilité des nouveaux dispositifs en situation de conduite normale «simulée », afin d'examiner cette fois-ci non pas uniquement la performance mais également l'activité telle qu'elle est menée. C'est pour atteindre ce deuxième objectif, que nous avons donc mis en place une deuxième série expérimentale qui va nous permettre d'examiner les différentes stratégies adoptées par les conducteurs, lors de la réalisation de scénarios reproduisant des situations plus réalistes liées à la conduite.

6. DEUXIEME SERIE EXPERIMENTALE : EVALUATION GLOBALE DU CONCEPT LIE A LA REGULATION DE LA VITESSE EN SITUATION DE CONDUITE SIMULEE

6.1 Objectifs

Lors de cette deuxième série expérimentale, nous cherchons à évaluer le concept global lié à la régulation de la vitesse, composé de nouvelles interfaces physiques (le manipulateur et la VI), visuelles et sonores. En effet, le dernier souhait du groupe projet par rapport à l'étude menée en laboratoire, est de pouvoir identifier la manière avec laquelle les conducteurs vont conduire demain, afin de vérifier si l'introduction des nouveaux dispositifs ne perturbe pas la conduite et leur permet de respecter globalement la tâche qui leur est confiée. L'objectif ici, est donc de pouvoir valider la mise en place de l'ensemble des nouveaux dispositifs sur une rame prototype du TGV, en examinant les **stratégies de conduite** engendrées par l'utilisation des ces dispositifs.

Ainsi, pour cette deuxième série expérimentale, 11 conducteurs volontaires de l'étude ont été amenés à conduire sur le simulateur en respectant les consignes de scénarios appelés « **scénarios de conduite libre** ». Ces scénarios ont pour objectif de tester l'utilisation des dispositifs dans des situations de conduite « normales », en reproduisant des situations de conduite que les conducteurs rencontrent tous les jours. Nous allons examiner les stratégies adoptées par les conducteurs , en phase de conduite simulée, lors de situations de conduite dites « normales » afin de vérifier l'adéquation entre le concept global retenu lié à la régulation de la vitesse et la tâche demandée au conducteur.

A ce niveau de l'étude, c'est plus la performance globale du système homme/produit qui nous intéresse, que l'examen précis de l'influence des choix de conception effectués, dans la mesure où ceux-ci seront de nouveau examinés de manière détaillée en situation de conduite réelle lors d'une dernière étape de validation sur le terrain.

Ainsi, dans ce chapitre, nous décrirons plus particulièrement les résultats liés aux **stratégies liées à l'utilisation du manipulateur**, en particulier lors des phases d'arrêts en gare, qui lors des études préliminaires ont été identifiées par le groupe projet comme des phases de conduite nécessitant une attention particulière des conducteurs. En effet, ils doivent veiller au respect de l'horaire, au confort des passagers, à la sécurité des personnes en gare, au respect des éléments liés aux freins,...

Nous présenterons également les résultats liés aux **stratégies de prise d'informations visuelles**, dans la mesure où les modifications liées à la mise en place des informations visuelles sur écrans constitue une innovation importante et comporte des risques dans la mesure où les prises de décision des conducteurs, lors de la régulation de la vitesse, reposent essentiellement sur ces informations.

Lors de ces deux évaluations, nous avons cherché à comparer les stratégies de conduite identifiées à des stratégies de conduite actuelles. Dans la mesure où nous n'avons pas pu installer les dispositifs actuels sur le simulateur, nous avons fait référence à des situations de conduite réelles, afin de les comparer à nos situations simulées.

Nous avions déjà à disposition les résultats des études préliminaires concernant 12 parcours en TGV, que nous avons complété par ceux obtenus sur le parcours Nice-Paris. En effet, ce parcours fait l'objet d'une étude concernant la fatigue des conducteurs de train (SAGOT et coll., 1997) dont les dépouillements sont déjà largement avancés. De plus, lors de ces parcours, les relevés sont beaucoup plus complets que ceux réalisés dans notre étude, dans la mesure où nous avons à disposition les données issues de la boîte noire du train (ATESS), qui n'étaient pas accessibles lors de nos précédents parcours. Cette boîte noire, qui est rendue aujourd'hui exploitable par les moyens informatiques mis en place à bord des trains, nous a permis de relever l'ensemble des indications liées à la vitesse en fonction de la distance parcourue sur le parcours réel ainsi qu'un certain nombre d'actions effectuées et ceci pour 3 conducteurs différents (conducteurs NP1, NP2 et NP3).

Malheureusement, cette portion de ligne n'a pu être reproduite sur le simulateur, dans la mesure où aucun vidéodisque n'existe concernant cette ligne. Nous nous sommes donc attachés à trouver des portions de lignes qui présentent des situations de conduite similaires, dans l'objectif de comparer les stratégies identifiées dans des conditions de conduite proches.

6.2 Méthodes

A. Le scénario de conduite libre

Comme nous l'avons déjà mentionné, nous cherchons ici à comparer les stratégies de conduite lors de l'utilisation des nouveaux dispositifs en phase de conduite simulée, aux stratégies de conduite actuelles, en situation de conduite réelle.

Concernant la situation de conduite réelle, nous avons retenu la première demi-heure du trajet Nice-Paris, qui fait l'objet d'une étude concernant la fatigue des conducteurs de train (SAGOT, 1997). En effet, cette première demi-heure de parcours réel présente l'intérêt que les conducteurs ont à effectuer deux arrêts en gare et circulent sur une portion de ligne classique sur laquelle ils sont amenés à consulter visuellement sur la voie plusieurs informations liées aux changements de signalisation. Cette configuration de scénario nous permet ainsi d'examiner à la fois les stratégies d'arrêts en gare et la prise d'information visuelle.

Parmi nos scénarios de conduite libre, nous avons retenu une portion du trajet Libourne-Bordeaux, qui présente la particularité de comporter également deux arrêts en gare successifs, pour une distance proche de celle relevée lors du trajet réel Nice-Paris. Cette portion de ligne classique présente également de nombreux changements de vitesse dans des plages comparables au parcours réel Nice Paris.

B. Déroulement des expérimentations

Les conducteurs ont pour consigne de respecter les vitesses indiquées sur l'image de la voie donnée par le vidéodisque, ainsi que la réglementation SNCF. Chaque conducteur possède la fiche train du parcours, afin de pouvoir se repérer sur la ligne en fonction des points kilométriques indiqués et d'effectuer les arrêts en gare à l'horaire spécifié. Deux caméras disposées dans la cabine du simulateur permettent de filmer la posture, ainsi que le visage du conducteur afin de pouvoir étudier les directions du regard. A la fin de la passation du scénario, les conducteurs peuvent s'exprimer sur les différentes séquences au cours desquelles ils rencontrent des difficultés, en s'appuyant sur les différents films.

C. Les relevés

Le groupe projet a tenu à vérifier ici qu'avec les nouveaux outils liés à la régulation de la vitesse, les conducteurs peuvent adopter des stratégies de conduite qui vont leur permettre de se rapprocher des performances de conduite actuelles, voire de les améliorer. Afin d'identifier les stratégies adoptées lors de l'utilisation des nouveaux dispositifs, nous avons donc procédé ici à plusieurs relevés lors du déroulement du scénario de conduite libre :

- le type, le nombre et le déroulement chronologique des actions,
- les taux de vitesse demandés et réalisés,
- les taux d'efforts en traction et freinage réalisés,
- les paramètres de vitesse imposée.

Concernant le parcours Nice-Paris, nous avons retracé pour les trois conducteurs, la courbe de vitesse réelle enregistrée sur ATESS et la courbe de vitesse de consigne issue des schémas de ligne SNCF (Figure 80).

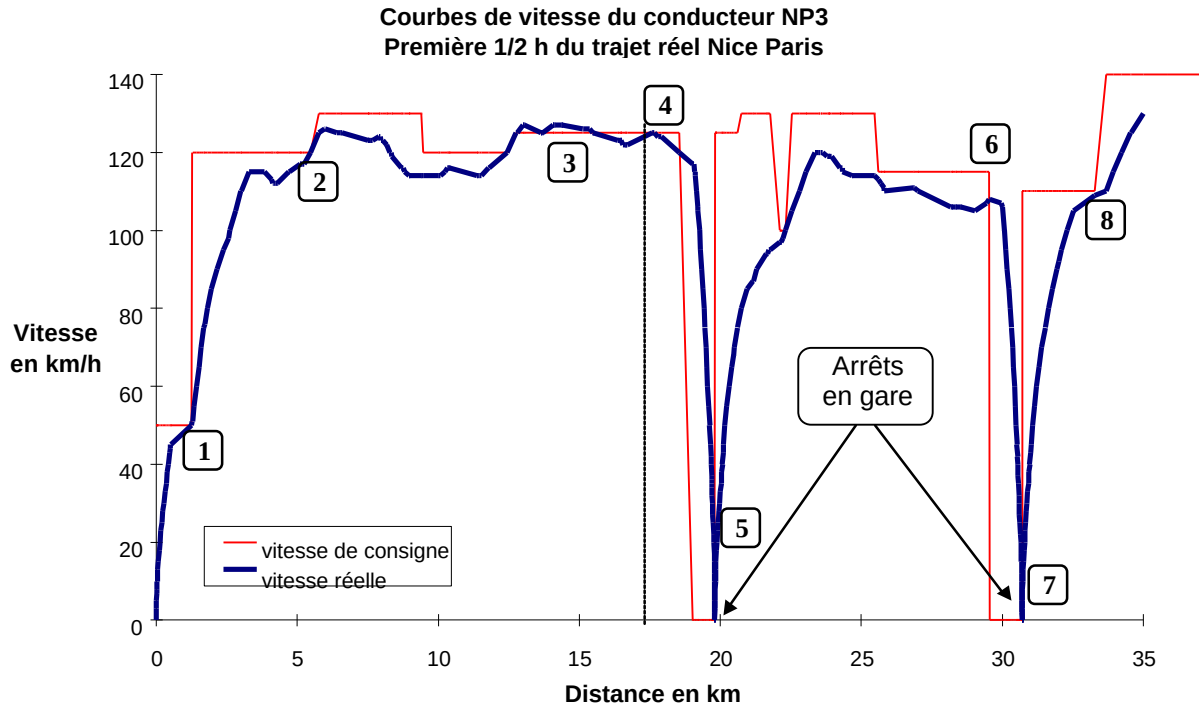


Figure 80 : Courbes de vitesse réelle et de vitesse but instantanée.
Trajet réel Nice Paris - conducteur NP3.

On peut d'ors et déjà remarquer sur la Figure 80, que lors de la situation de conduite réelle le conducteur vient fréquemment tangenter la courbe de vitesse de consigne (repères 1, 2, 6,

8), et ceci essentiellement dans les phases de montée en vitesse. Par contre (et cela est essentiellement lié au profil de la ligne), il ne cherche pas forcément à venir exactement tangenter la courbe de vitesse de consigne lorsqu'il doit maintenir sa vitesse. Dans cet exemple, on peut également voir qu'il va jusqu'à laisser dépasser légèrement la vitesse de consigne (repère 3). Pour les deux arrêts en gare (repères 5 et 7), on remarque qu'il procède différemment. En effet, 1000 mètres avant la gare, un panneau lui indique son arrivée en gare. Dans le premier cas, il a anticipé l'information à l'aide de la fiche train (repère 4), dans la mesure où il commence à freiner bien avant cette indication. Dans le deuxième cas, (repère 6), il n'anticipe pas l'indication et va même commencer à freiner au delà du panneau qui n'est qu'indicatif et qui donc ne présente pas une obligation de ralentissement.

Nous avons de la même manière tracé pour les 11 conducteurs qui effectuent les expérimentations sur simulateur, la courbe de vitesse réelle et la courbe de vitesse de consigne (Figure 81).

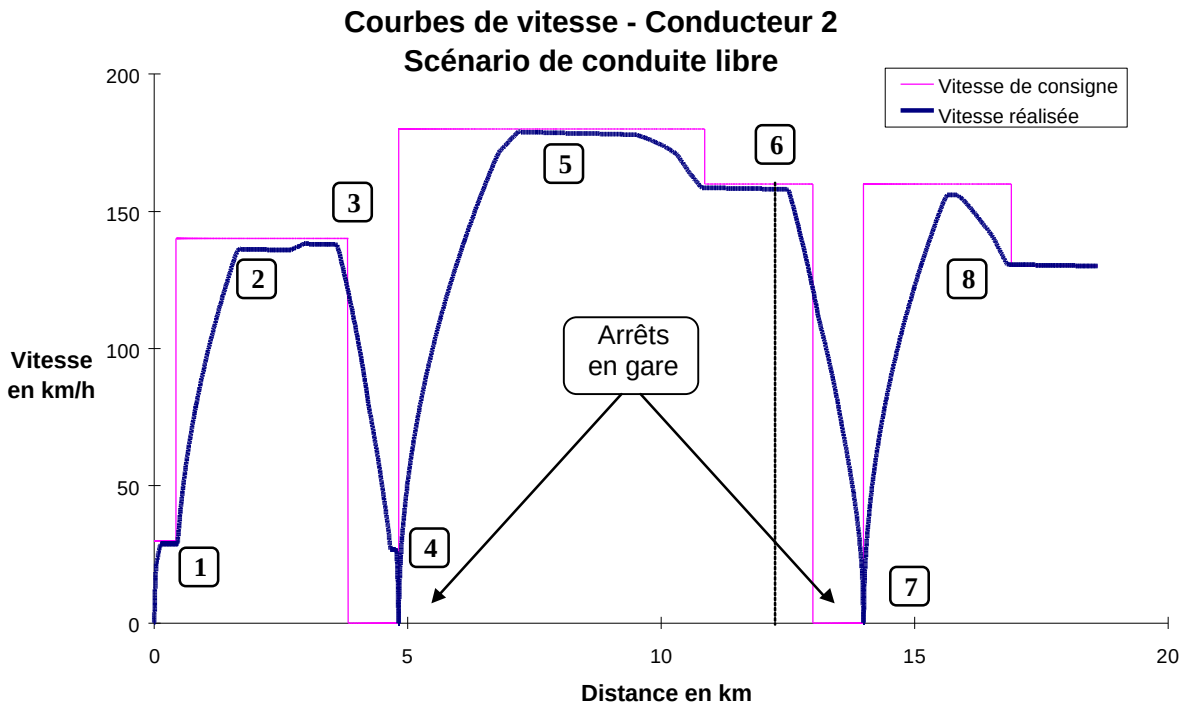


Figure 81 : Courbes de vitesse réelle et de vitesse but instantanée
Scénario de conduite libre - conducteur 2.

Sur la Figure 81 qui donne un exemple du scénario effectué sur simulateur, on voit que le conducteur vient également tangenter la courbe de vitesse de consigne (repères 1, 2, 5, 8).

Dans la mesure où le profil de la ligne n'était pas très accidenté, on constate qu'il vient également tangenter la courbe de vitesse de consigne lorsqu'il maintient sa vitesse. Pour les deux arrêts en gare (repères 4 et 7), il a anticipé l'information liée au freinage. Dans le premier cas, (repère 3), il commence à freiner dès qu'il aperçoit le panneau. Dans le deuxième cas, (repère 6), il anticipe la consigne bien avant de pouvoir observer le panneau indiquant la gare, en faisant référence à sa fiche train.

Ainsi, nous pouvons dire que l'on retrouve ici des comportements assez similaires concernant l'évolution de la vitesse en phases de conduite réelle et simulée, sur des portions de parcours présentant des caractéristiques proches.

Concernant l'étude des stratégies visuelles, nous avons à disposition le relevé des directions de regard obtenu à l'aide de la caméra placée face aux sujets en cabine de conduite lors du parcours Nice-Paris et placée dans le simulateur lors des expérimentations en laboratoire. Ces relevés ont été effectués à l'aide du logiciel KRONOS, sur lequel nous avons installé un protocole spécifique lié au dépouillement des regards, qui nous permet de relever au cours du temps les changements de direction de regard.

6.3 Résultats

6.3.1 Résultats liés à l'étude des phases d'arrêts en gare

A. Répartition des fonctions utilisées pour la régulation de la vitesse

Nous avons pu vérifier en premier lieu que les conducteurs ont réussi à effectuer leur parcours sur simulateur en respectant les consignes de vitesse et qu'ils ont effectué les arrêts en gare à l'heure indiquée par la fiche train. Nous avons ensuite cherché à identifier la manière dont ils procèdent lors du déroulement du parcours réel (Figure 80) et lors du parcours de conduite simulé (Figure 81), qui présentent des caractéristiques similaires concernant les arrêts en gare.

A titre de comparaison, la Figure 82 ci-dessous, permet de visualiser la répartition du nombre de fois où les conducteurs ont utilisé le freinage électrique, pneumatique, ou la

traction, sur la durée des parcours examinés en situations réelle et simulée, c'est-à-dire avec l'ancien et le nouveau manipulateur.

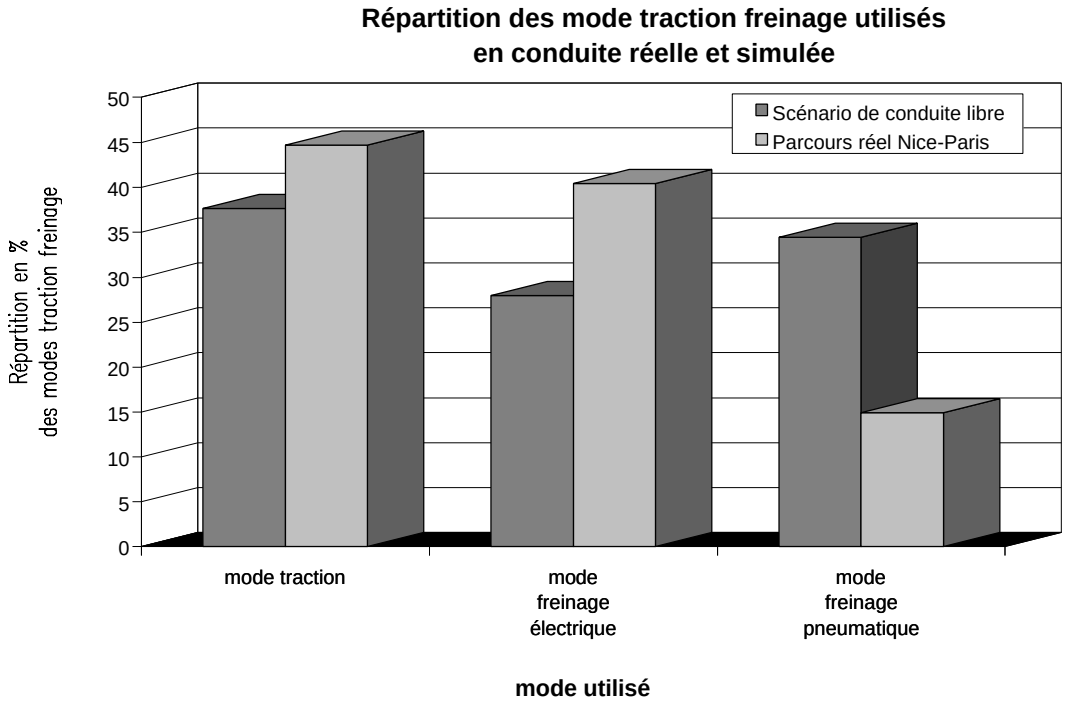


Figure 82 : Répartition du nombre de fois où les conducteurs ont utilisé le freinage électrique, pneumatique, ou la traction pour les 11 conducteurs lors du scénario de conduite libre et pour trois conducteurs lors de la première demi-heure de Paris Nice.

On constate Figure 82 que l'activation du mode freinage pneumatique, est plus fréquente lors de la conduite simulée, avec le nouveau manipulateur de traction freinage mis en place que lors de la conduite réelle avec l'ancien dispositif.

Or, lors des études préliminaires, nous avons pu constater que l'utilisation du frein pneumatique est dépendante de la connaissance de ligne, dans la mesure où si le conducteur anticipe, il n'a pas besoin d'utiliser ce mode de freinage. De plus, nous savons que les conducteurs doivent limiter l'utilisation de ce mode de freinage, afin de respecter les critères de conduite liés à la préservation du matériel et en particulier les sabots des freins.

Nous avons donc cherché à vérifier que l'utilisation fréquente de ce mode de freinage est plus liée au fait que les conducteurs ne connaissent pas la ligne qu'au fait que la mise à disposition de ce mode de freinage sur la commande principale de traction freinage puisse inciter les conducteurs à l'utiliser plus souvent.

En accord avec le groupe projet, nous avons cherché alors à examiner plus précisément les stratégies adoptées par les conducteurs lors des arrêts en gare, dans la mesure où c'est principalement lors de ces arrêts que la fonction de freinage pneumatique est utilisée.

B. Etude des stratégies liées à l'utilisation du manipulateur

Afin de pouvoir comparer les stratégies de conduite liées au nouveau manipulateur, nous avons relevé dans un premier temps le nombre d'actions spécifiquement liées à la régulation de la vitesse : FCG, PLUS, TPLUS, MOINS et ZERO (réf. page 80), lors de la passation du scénario de conduite libre Libourne-Bordeau, sur simulateur (Figure 81). Ces données ont été regroupées dans le Tableau 12 ci-dessous, où figurent la répartition des actions et le nombre total d'actions pour chaque conducteur.

Conducteurs / % actions	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c10	c11	c12
FCG	4,17	12,40	9,63	8,57	8,08	3,08	7,76	9,17	7,37	5,43	8,64
ZERO	11,11	10,08	7,41	5,71	2,02	15,38	9,48	8,26	4,21	5,43	8,64
PLUS	47,22	30,23	45,93	44,76	37,37	47,69	40,52	44,95	43,16	56,59	43,21
TPLUS	6,94	9,30	5,19	5,71	6,06	7,69	5,17	6,42	9,47	3,88	4,94
MOINS	30,56	37,98	31,85	35,24	46,46	26,15	37,07	31,19	35,79	28,68	34,57
Nb total d'actions	72	129	135	105	99	65	116	109	95	129	81

Tableau 12 : Nombre et répartition des actions liées à la régulation de la vitesse lors du scénario de conduite libre.

Nous avons alors cherché à identifier si les 11 conducteurs utilisent différemment les fonctions du manipulateur, en analysant les données du Tableau 12 par une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC). En effet, cette méthode d'analyse, vise à rassembler sur un graphique (le plan factoriel), la plus grande partie possible de l'information contenue dans le Tableau 12 en s'attachant non pas aux valeurs absolues, mais aux correspondances entre les caractéristiques décrites, c'est-à-dire aux valeurs relatives. L'AFC a ainsi été menée sur la base des résultats des répartitions d'actions obtenues par les 11 conducteurs, lors du scénario de conduite libre. L'objectif de cette analyse est de faire ressortir des groupes de conducteurs en fonction des actions menées avec le manipulateur.

Les résultats obtenus par l'AFC (Figure 83) traduisent un phénomène qui sur la base des deux premiers axes d'inertie est expliqué à 54.1%.

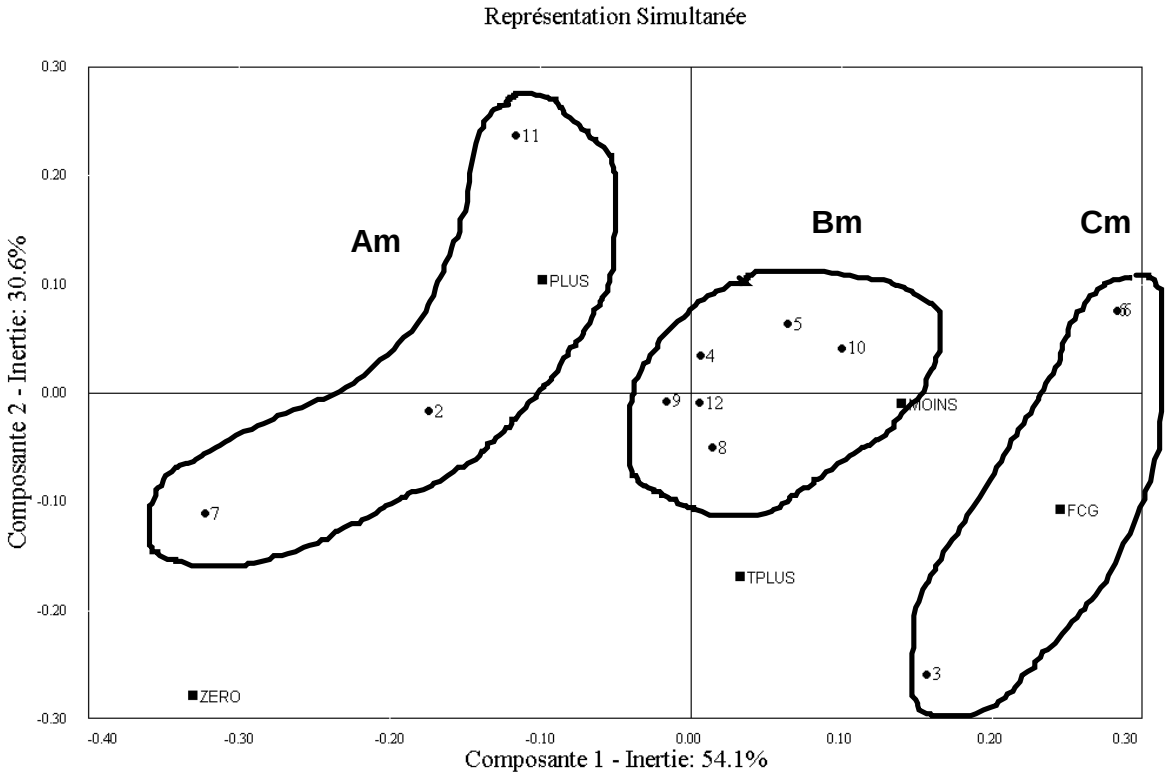


Figure 83 : Représentation du plan factoriel suivant les deux premières composantes de l'AFC concernant les actions sur le manipulateur pour les 11 conducteurs lors du scénario de conduite libre.

Le premier axe factoriel (composante 1) caractérise essentiellement les conducteurs qui utilisent fréquemment le freinage pneumatique (FCG) et la fonction MOINS en opposition à ceux qui utilisent peu la fonction FCG et fréquemment la fonction ZERO et PLUS. Le deuxième axe factoriel (composante 2) caractérise les conducteurs dans une moindre mesure en fonction de l'utilisation des fonctions ZERO-TPLUS et PLUS.

Nous avons ainsi distingué 3 groupes de conducteurs (Figure 83), en fonction de l'utilisation des fonctions du manipulateur, groupes que nous avons appelé : Am, Bm et Cm (indice m, comme manipulateur). Afin de vérifier si les répartitions des fonctions utilisées sont significativement différentes entre les groupes, nous avons effectué une analyse de variance entre les répartitions moyennes des fonctions utilisées relatives à chacun des groupes. Il apparaît que les groupes Am, Bm et Cm ne sont pas significativement différents entre eux (NS). Cela montre que globalement les stratégies liées à l'utilisation du manipulateur ne sont pas très différentes en fonction des conducteurs et que seuls certains d'entre eux ont favorisé l'une ou l'autre des fonctions. Nous avons donc cherché à détailler d'un point de vue descriptif les différentes stratégies en examinant les courbes de vitesse caractéristiques obtenues pour chacun des groupes.

C. Etude des courbes de décélération lors des arrêts en gare

Le groupe Am est caractérisé par une faible utilisation du freinage pneumatique (FCG) et par l'utilisation fréquente des fonctions ZERO et PLUS. L'exemple type est celui du conducteur 7 (Figure 84), qui effectue un freinage pneumatique sur les tous derniers mètres de son deuxième arrêt en gare. Lors d'un entretien avec un chef de traction de la SNCF, celui-ci nous a indiqué que l'on a ici un type de conduite que l'on peut qualifier de conduite « en douceur », dans la mesure où le freinage électrique est nettement moins « brusque » que le freinage pneumatique. Ce type de conduite implique beaucoup d'anticipation et donc une régulation fine des efforts de traction ou de freinage, d'où l'utilisation fréquente de la fonction PLUS. Dans la mesure où le conducteur utilise fréquemment la mise à zéro des efforts de traction ou de freinage électrique (ZERO), il utilise peu la fonction MOINS.

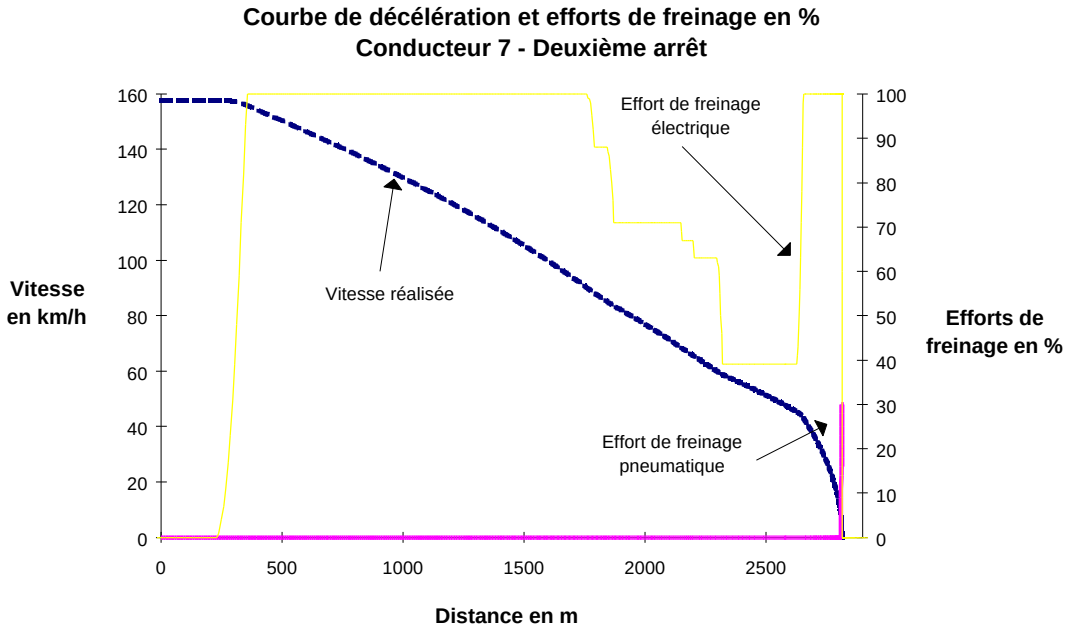


Figure 84 : Courbe de décélération et efforts de freinage pour le conducteur 7, lors du deuxième arrêt en gare (scénario de conduite libre).

Le groupe Bm, qui regroupe la majorité des conducteurs est caractérisé par une utilisation combinée des différentes fonctions du manipulateur. L'exemple type est celui du conducteur 9 (Figure 85), qui effectue sa phase de freinage en utilisant dans un premier temps le frein pneumatique pour casser sa vitesse à l'approche de la gare, puis qui va utiliser la combinaison du freinage électrique et pneumatique pour s'arrêter sur les derniers mètres.

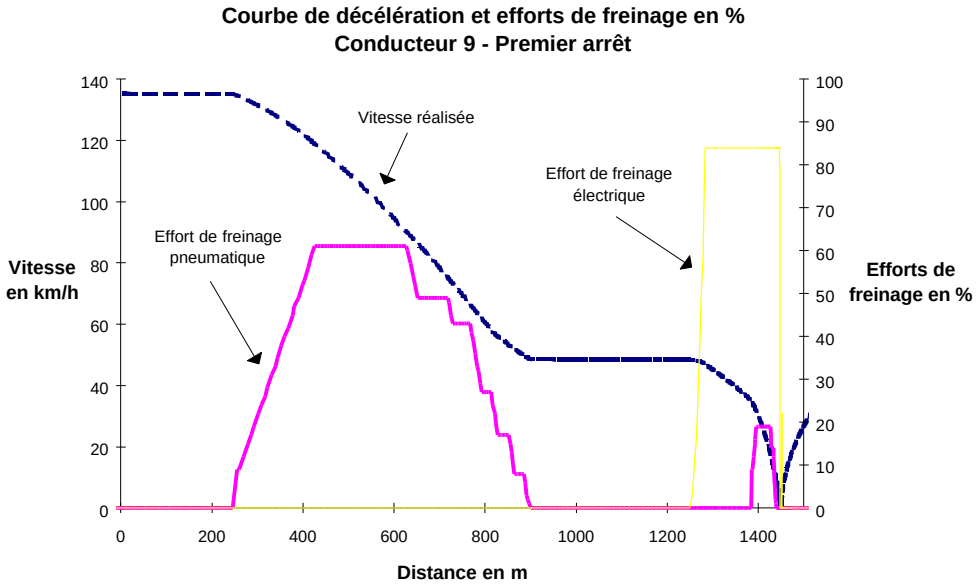


Figure 85: Courbe de décélération et efforts de freinage pour le conducteur 9, lors du premier arrêt en gare (scénario de conduite libre).

Le groupe Cm est caractérisé par une forte utilisation du freinage pneumatique (FCG) et de la fonction MOINS. L'exemple type est celui du conducteur 3 (Figure 86), qui effectue du freinage pneumatique dès qu'il voit le panneau annonçant la gare à 1000 m. Lors de la phase d'arrêt le conducteur est amené par deux fois à « casser sa vitesse ».

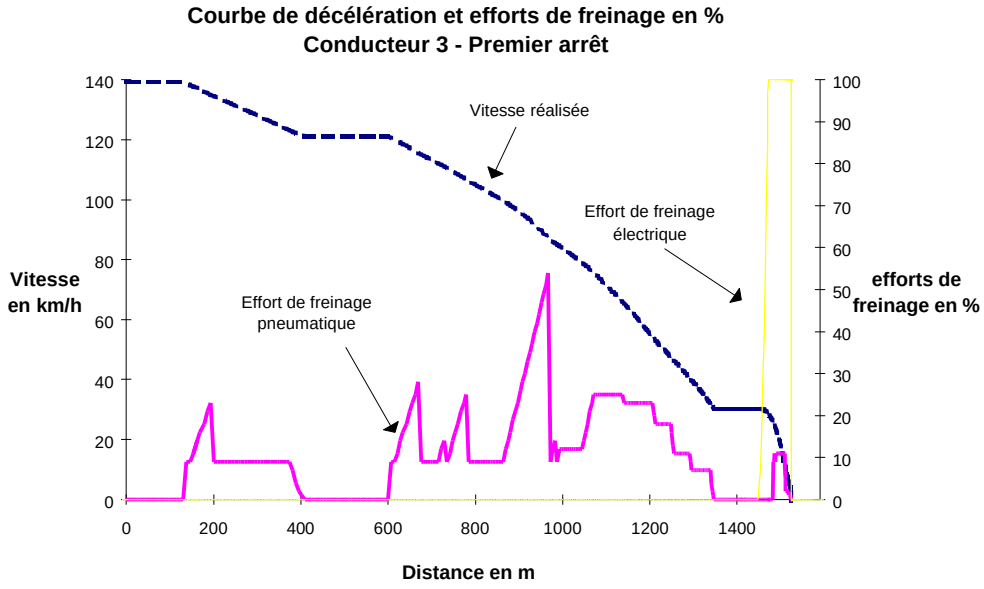


Figure 86 :Courbe de décélération et efforts de freinage pour le conducteur 3, lors du premier arrêt en gare (scénario de conduite libre).

Cette technique (Figure 86) consiste à atteindre une vitesse donnée et à maintenir ce palier de vitesse en marche sur l'erre. Durant le laps de temps du palier, il peut ainsi surveiller la voie sans avoir à se préoccuper de sa vitesse.

D. Discussion des résultats concernant les phases d'arrêts en gare

L'étude du comportement de conduite des mécaniciens en situation de conduite réelle (BOLLON et coll., 1992), lors de l'analyse de l'existant, avait permis de mettre en évidence que les conducteurs sont amenés pendant l'approche des gares, à effectuer deux types de séquences de ralentissement : soit ils diminuent de manière progressive leur vitesse, soit ils vont « casser la vitesse » en amont de la gare afin de mieux pouvoir se concentrer sur l'arrêt en gare. Ce sont ces deux stratégies que l'on retrouve chez l'ensemble des conducteurs en amont des gares, lors de la passation du scénario de conduite libre simulée étudié.

Les relevés effectués, ainsi que les verbalisations réalisées lors de l'étude du comportement de conduite des mécaniciens en situation de conduite réelle, ont également permis de montrer que les conducteurs utilisent essentiellement des informations de nature informelles (repères latéraux, sensation de ralentissement,...) lors de la phase finale d'arrêt en gare. Ils ne tiennent que rarement compte de l'indication figurant sur le tachymètre. Dans le cadre de nos simulations, un grand nombre de ces repères, et en particulier la notion de ralentissement du train, n'ont pas pu être recréés, créant une difficulté supplémentaire pour les conducteurs qui ne « ressentent » pas l'effet de leurs actions. Cet aspect peut certainement expliquer le fait que le mode de freinage pneumatique est plus fréquemment utilisé en phase de conduite simulée, dans la mesure où n'ayant pas de repères, les conducteurs préfèrent utiliser le frein le plus efficace. Tous ont cependant réussi à réaliser leurs arrêts dans de bonnes conditions selon des stratégies de conduite habituelles.

Il faudra néanmoins vérifier l'ensemble de ces résultats dans le sens où la pratique d'un tel manipulateur demande un certain temps pour pouvoir découvrir toutes les possibilités d'utilisation. L'usage se construit au fur et à mesure de l'utilisation, comme le souligne RABARDEL (1995) : «la construction des artefacts (nouvelles fonctionnalités attribuées à l'outil et correspondant à un usage particulier) se fait au cours de la pratique». Il faudra donc veiller, au cours du temps, à identifier les éventuelles nouvelles stratégies de conduite liées à l'utilisation du manipulateur et vérifier leur cohérence par rapport à la tâche demandée.

6.3.2 Résultats liés à l'étude des stratégies visuelles

A. Répartition des regards

Nous avons pu vérifier que l'ensemble des conducteurs a réussi à effectuer le scénario de conduite libre sur le simulateur en respectant les consignes de vitesse et que chacun a effectué les arrêts en gare à l'heure indiquée par la fiche train. Nous nous sommes donc attachés à identifier la manière dont ils procèdent lors du prélèvement de l'information pendant le déroulement du parcours réel (Figure 80) et lors du parcours de conduite simulée (Figure 81), qui présentent des caractéristiques similaires.

A titre de comparaison, la Figure 87 ci-dessous, permet de visualiser la répartition des regards en terme de durée en situations réelle et simulée, c'est-à-dire avec les dispositifs actuels et les nouveaux dispositifs. On constate ici que le temps de regard sur la voie diminue au profit des regards vers l'intérieur dans le cas de la conduite simulée avec la présence des trois écrans sur le poste de conduite du simulateur.

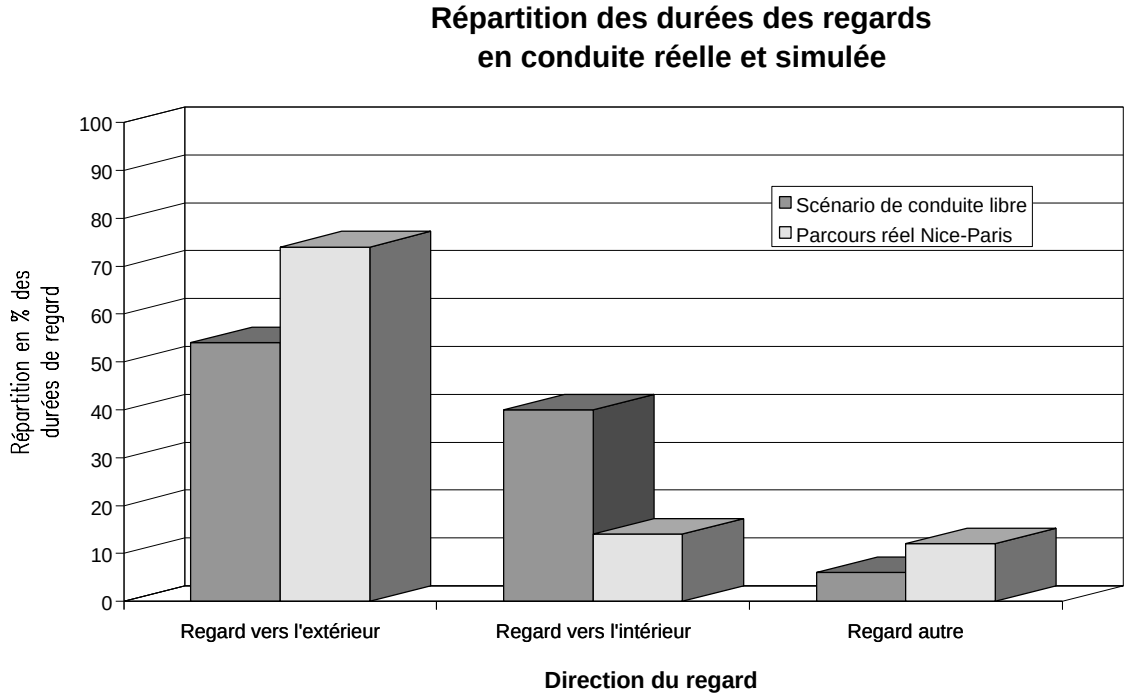


Figure 87 : Répartition des durées de regard pour les 11 conducteurs lors du scénario de conduite libre et pour trois conducteurs lors de la première demi-heure de Paris Nice.

A titre également de comparaison, la Figure 88 ci-dessous, permet de visualiser la répartition des regards en termes d'effectifs en situations réelle et simulée .

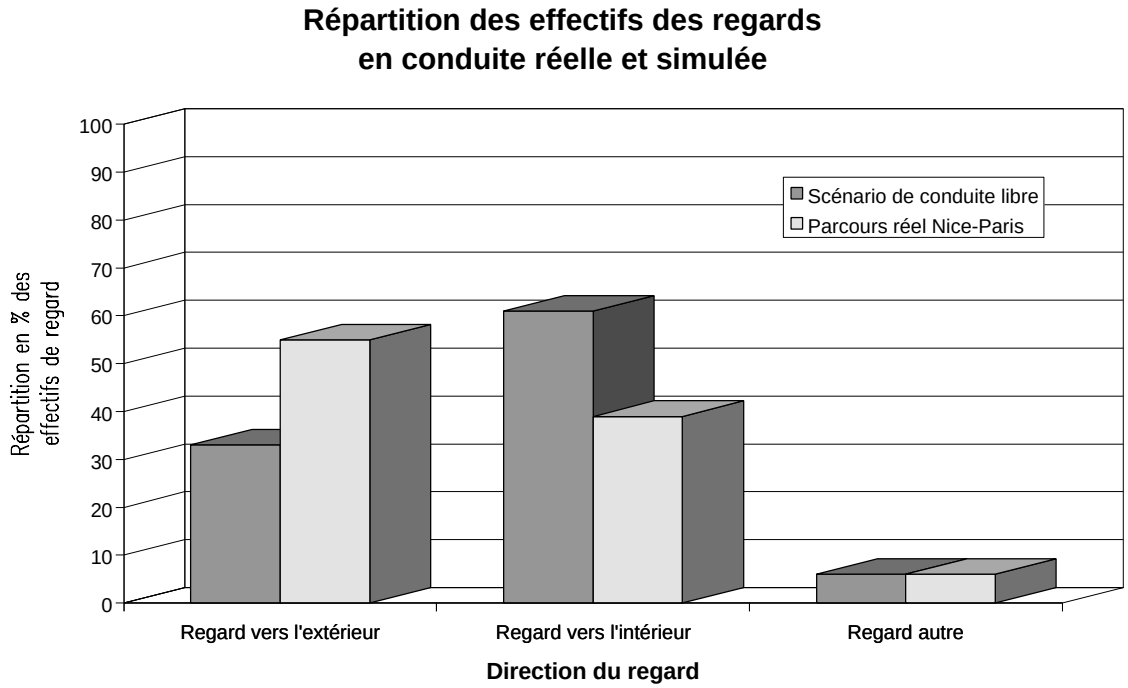


Figure 88 : Répartition des effectifs de regard pour les 11 conducteurs lors du scénario de conduite libre et pour trois conducteurs lors de la première demi-heure de Nice-Paris.

On constate **Figure 58** que la fréquence de consultation de la voie diminue au profit de la fréquence des regards portés vers l'intérieur, dans le cas de la conduite simulée avec la présence des trois écrans sur le poste de conduite du simulateur.

Par contre, nous avons également constaté que la fréquence de changement de direction de regard est approximativement 4 fois plus élevée en phase de conduite simulée qu'en phase de conduite réelle alors que les temps de fixation du regard sur les différents éléments n'ont que légèrement diminués.

Nous nous sommes donc attachés à examiner les stratégies visuelles adoptées par les conducteurs afin de mieux comprendre comment s'organise la prise d'information avec trois écrans.

B. Etude des stratégies visuelles

Pour comparer les stratégies visuelles liées à la présence de trois écrans en cabine, nous avons relevé dans un premier temps les séquences de regard type lors de la passation du

scénario de conduite libre Libourne-Bordeaux, sur simulateur (Figure 81). Le Tableau 13 ci-dessous regroupe toutes les séquences types des trois items principaux identifiés (VO : voie; TR : écran Traction/Freinage; VI : écran vitesse). Leur sélection a été effectuée selon le critère suivant : une séquence type apparaît en fréquence (effectif) plus de 50 fois au cours de la passation du scénario de conduite libre, pour au moins un des sujets. Ce tableau présente donc les pourcentages d'apparition de ces séquences de trois items sur l'ensemble des séquences types identifiées.

Conducteurs / Séquence	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c10	c11	c12
VO-TR-VI	17,51	14,07	10,08	13,04	11,61	12,11	10,77	13,83	18,10	16,63	12,53
VI-VO-TR	14,85	11,25	12,04	13,50	11,87	11,38	12,69	9,47	14,01	11,02	12,53
TR-VI-VO	15,65	14,32	9,24	16,48	13,19	13,94	11,54	9,95	18,53	19,01	12,27
VO-VI-TR	6,63	11,51	8,68	13,50	9,76	10,64	8,46	6,55	7,76	13,17	8,36
VI-VO-VI	8,22	9,46	8,12	11,21	13,19	13,94	10,77	2,91	7,97	11,02	4,96
VO-TR-VO	10,08	8,44	19,61	7,78	10,82	8,62	15,38	21,36	8,62	5,83	21,15
TR-VO-TR	10,08	10,49	12,89	6,86	9,23	9,91	11,54	21,12	9,27	8,42	15,93
VO-VI-VO	10,08	7,16	13,45	10,53	13,72	11,93	14,42	5,83	7,97	7,34	8,36
TR-VI-TR	6,90	13,30	5,88	7,09	6,60	7,52	4,42	8,98	7,76	7,56	3,92

Tableau 13 : Répartition des séquences de regards types en %
(VO : voie; TR : écran Traction/Freinage; VI : écran vitesse)

Afin de vérifier si les sujets accordent des statuts différents aux sources informationnelles, nous avons analysé les données du Tableau 13 en réalisant une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC). L'objectif de cette analyse est de faire ressortir des groupes de conducteurs en fonction des stratégies visuelles adoptées.

Les résultats obtenus par l'AFC (Figure 89) traduisent un phénomène qui sur la base des deux premiers axes d'inertie est expliqué à 84.4%.

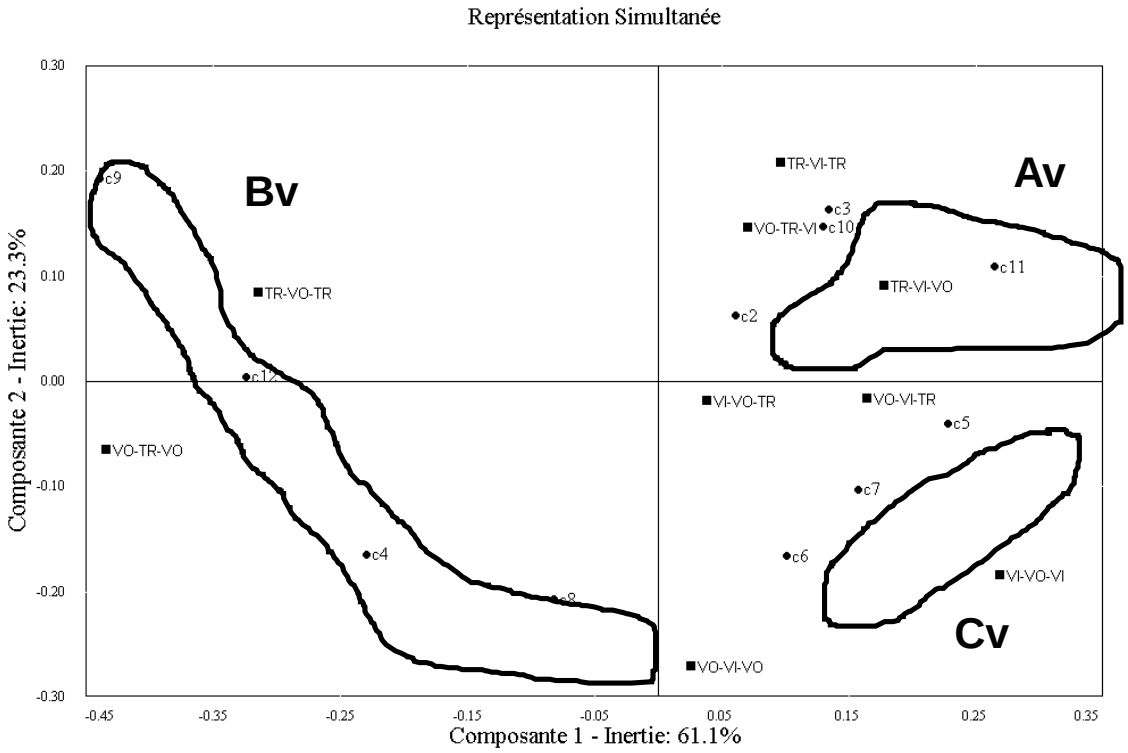


Figure 89 : Représentation du plan factoriel suivant les deux premières composantes de l'AFC concernant les séquences de regard en fonction des 11 conducteurs.

Le premier axe factoriel (composante 1) caractérise essentiellement les conducteurs qui effectuent de nombreux changements de regard entre la voie et l'écran de traction (VO-TR-VO ; TR-VO-TR). Le deuxième axe factoriel (composante 2) caractérise les conducteurs qui effectuent de nombreux changements de regard entre la voie et l'écran vitesse (VO-VI-VO ; VI-VO-VI).

On peut donc distinguer 3 groupes de conducteurs correspondants à l'organisation des prises d'informations visuelles chez les conducteurs (Figure 90) : Av, Bv et Cv (indice v, comme vision).

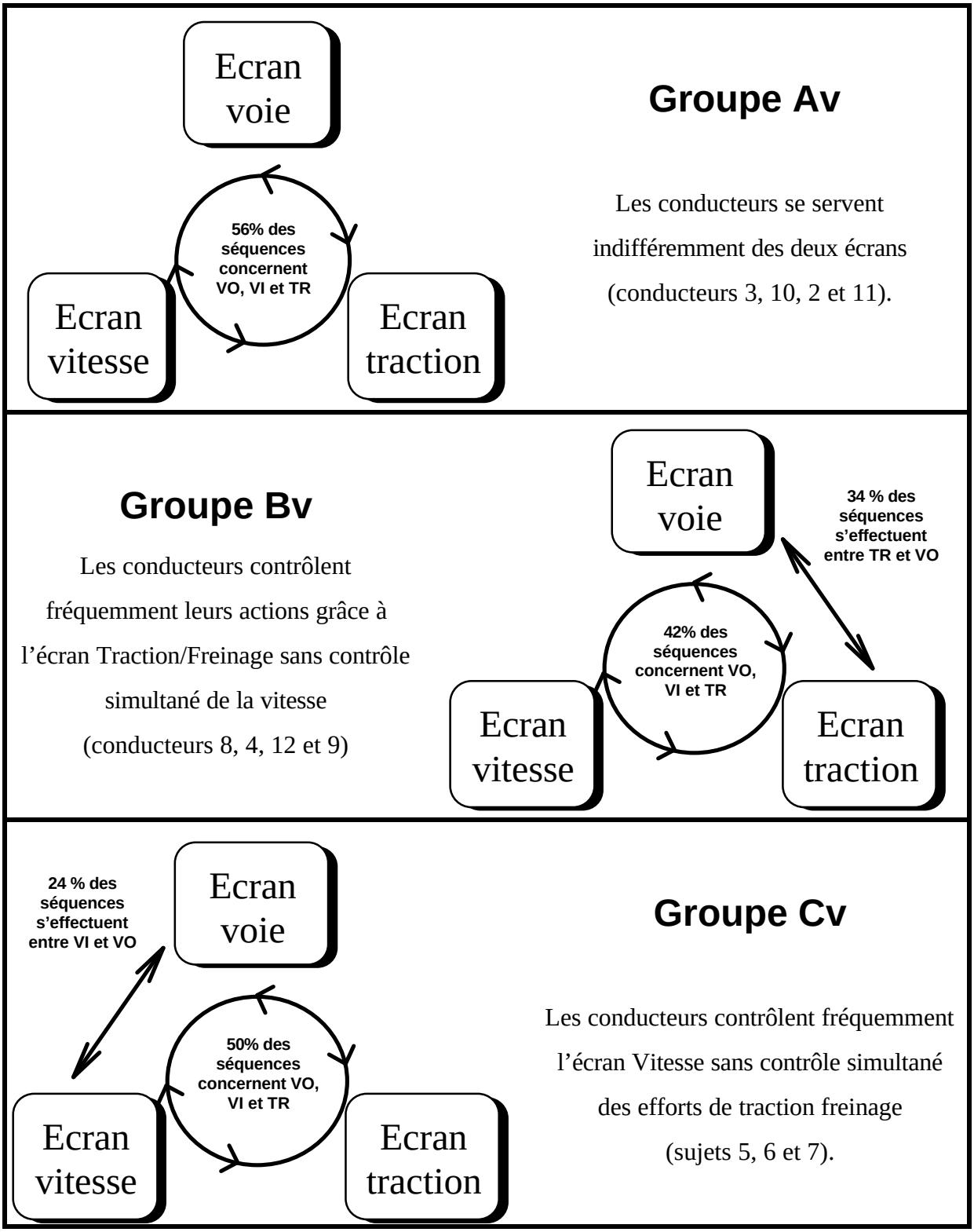

Ecran voie
Ecran vitesse
Ecran traction
56% des séquences concernent VO, VI et TR
Groupe Av
Les conducteurs se servent indifféremment des deux écrans (conducteurs 3, 10, 2 et 11).
Groupe Bv
Les conducteurs contrôlent fréquemment leurs actions grâce à l'écran Traction/Freinage sans contrôle simultané de la vitesse (conducteurs 8, 4, 12 et 9)
Ecran voie
34 % des séquences s'effectuent entre TR et VO
42% des séquences concernent VO, VI et TR
Ecran vitesse
Ecran traction
24 % des séquences s'effectuent entre VI et VO
Ecran voie
50% des séquences concernent VO, VI et TR
Ecran vitesse
Ecran traction
Groupe Cv
Les conducteurs contrôlent fréquemment l'écran Vitesse sans contrôle simultané des efforts de traction freinage (sujets 5, 6 et 7).

Figure 90 : Séquences des regards identifiées chez trois groupes de conducteurs, lors de la passation du scénario de conduite libre.

Afin de vérifier si les répartitions des regards sont significativement différentes entre les différents groupes, nous avons effectué une analyse de variance entre les répartitions moyennes des regards relatives à chacun des groupes. Il apparaît que les groupes Av, Bv et Cv ne sont pas significativement différents (NS), ce qui indique que globalement les stratégies visuelles sont les mêmes, et que seuls quelques conducteurs consultent plus fréquemment un écran qu'un autre.

Ces résultats nous indiquent qu'en fonction des stratégies de conduite de chaque conducteur, ceux-ci contrôlent leurs actions essentiellement par des prises d'informations consécutives entre la voie, l'écran vitesse et l'écran traction/freinage.

De la même manière, et à titre indicatif, nous avons examiné la prise d'informations visuelles de 3 conducteurs (NP1, NP2 et NP3) sur la première demi-heure des parcours Nice Paris. Les directions de regard ont été regroupées de la manière suivante : VO : voie et extérieur - MA : Manomètres et Ampèremètres - VI : Tachymètre). On obtient la répartition des séquences suivantes (Tableau 14) :

Conducteur / Séquence	NP1	NP2	NP3
VO-TR-MA	1,52	1,35	0,66
MA-VO-TR	9,18	8,82	10,61
TR-MA-VO	1,26	2,39	0,66
VO-MA-TR	4,04	6,28	3,18
MA-VO-MA	25,02	19,73	22,28
VO-TR-VO	13,56	16,14	16,58
TR-VO-TR	4,55	6,43	5,70
VO-MA-VO	40,35	38,42	40,32
TR-MA-TR	0,51	0,45	0,00

Tableau 14 : Répartition des séquences de regards types en % pour les trois conducteurs lors de la première demi-heure du trajet réel Nice - Paris.

L'analyse de variance effectuée entre les différentes distributions a mis en évidence qu'il n'y a pas de différence significative entre ces 3 sujets (NS). Nous avons donc considéré que les 3 conducteurs appartiennent à un même groupe et que leur prise d'informations visuelles s'organise suivant les séquences illustrées Figure 91.

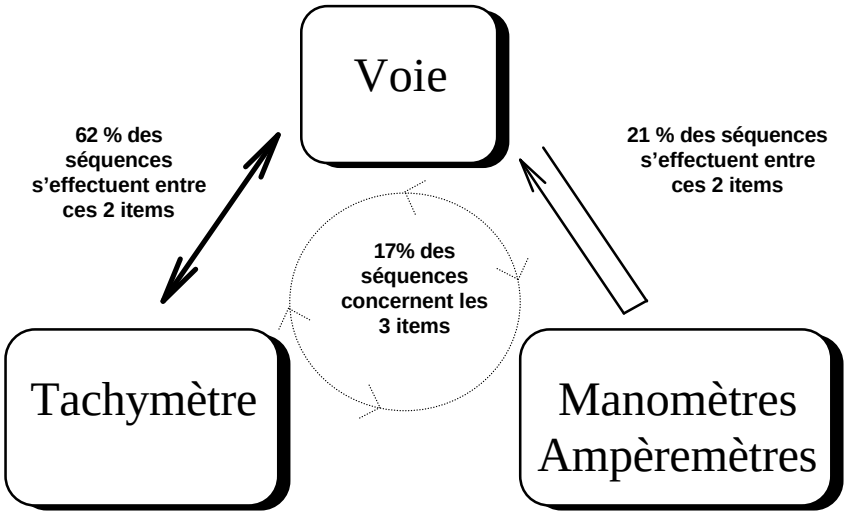

Voie
62 % des séquences s'effectuent entre ces 2 items
21 % des séquences s'effectuent entre ces 2 items
17% des séquences concernent les 3 items
Tachymètre
Manomètres Ampèremètres

Figure 91: Séquences des regards chez le groupe de conducteurs du parcours Nice-Paris.

Nous constatons ici une diminution du pourcentage de la séquence de regard qui concerne les trois écrans.

C. Discussion des résultats concernant l'étude des stratégies visuelles

Dans le cadre de cette étude portant sur les stratégies visuelles liées à l'utilisation d'une nouvelle forme de présentation de l'information, il est bien évidemment difficile de comparer la situation simulée à la situation réelle, dans la mesure où les informations installées sur les nouveaux dispositifs et l'environnement mis en place sont très différents de ceux existants.

? Pour les informations visuelles, nous avons palier à ce problème en étudiant les directions de regard portées sur les groupements d'informations que constituent les informations liées aux efforts de traction/freinage, à la vitesse et à l'environnement extérieur.

? Concernant l'environnement extérieur, les travaux de HUGUES et COLE (1986) ont montré que l'information visuelle présentée sur film en laboratoire, constitue un moyen approprié pour étudier la distribution de l'attention au niveau de la conduite automobile. En accord

avec leurs travaux, nous avons utilisé les images d'un vidéodisque pour recréer une source d'information visuelle pertinente dans le cadre de l'étude de l'organisation de la prise d'information visuelle lors de la conduite ferroviaire sur simulateur.

Ainsi, nous avons pu étudier la répartition des durées de regards sur les différents groupes d'informations visuelles en termes d'effectifs, de durées, et examiner les stratégies de prise d'information visuelle lors de l'examen des séquences de regards types. Les résultats obtenus tendent à prouver que le regroupement des informations visuelles concernant la régulation de la vitesse sur les écrans, favorise la consultation de l'ensemble des informations pouvant être dispensées en cabine. Dans la mesure où toutes les informations se situent dans la zone ou la prise d'information est facilitée (champ visuel central), il apparaît que les conducteurs sont plus fréquemment amenés à globalement les consulter. Ainsi, l'écran Traction/freinage qui peut être apparenté dans la situation actuelle aux manomètres et aux ampèremètres, devient un élément indispensable au contrôle de l'action. C'est un élément nouveau par rapport à la situation actuelle où l'observation de la consultation des instruments avait mis en évidence une utilisation peu importante des manomètres et ampèremètres, du moins pour une majorité des conducteurs. Ainsi, nous pouvons supposer que l'ensemble des choix effectués par le groupe projet concernant les interfaces visuelles, incite les conducteurs à contrôler plus fréquemment l'état de leur machine.

Mais cette répétition des consultations sur les trois écrans peut également démontrer un certain manque d'expertise des sujets par rapport à cette nouvelle forme de présentation de l'information (SPERANDIO, 1977). Il est donc possible qu'avec la pratique, ces stratégies évoluent, traduisant une recherche sélective des informations. De plus, nous avons pu constater que le nombre total de changement de direction de regard est nettement plus élevé en phase de conduite simulée qu'en phase de conduite réelle. Ceci peut s'expliquer par le fait que les conducteurs ne connaissent pas la ligne et peuvent être anxieux à l'idée de « manquer » des informations importantes au niveau de la voie, voire par le fait qu'ils sont en phase de conduite simulée sur des scénarios de courte durée, durant lesquels ils ont une attention plus soutenue.

Il faudra donc déterminer, suite à l'utilisation prolongée des dispositifs en situation réelle, de quelle manière la répartition des regards induite par l'utilisation des nouveaux dispositifs évolue.

Il peut également être intéressant d'affiner les études portant sur les stratégies visuelles en situation de conduite réelle, car elles sont déterminantes pour comprendre l'activité des conducteurs et détecter les problèmes liés à une mauvaise conception du système informationnel. Dans le cadre de la conduite automobile, NEBOIT (1974) souligne que le prélèvement de l'information, est un moment privilégié de l'activité de conduite :

? c'est le point de départ d'une décision, puisqu'il permet une évaluation des états actuels du système.

? c'est le résultat, la traduction comportementale en terme de stratégie d'exploration visuelle, d'une prévision sur l'état futur du système.

Ainsi, l'analyse des processus d'exploration visuelle peut permettre de déterminer les besoins informationnels du sujet ou de détecter au travers de l'analyse des directions de regard, les stratégies employées par les opérateurs. NEBOIT (1974) a ainsi étudié la saisie d'information dans le cadre de la conduite automobile, SPERANDIO (1977) dans le contrôle aérien et PAPIN (1979, cité par Spérandio 1977) ou ITOH et HAYASHI (1990), dans le cadre du pilotage aérien,.... WIERWILLE et RAHIMI (1985) se sont eux attachés à examiner la durée de fixation du regard qui est un indicateur précieux, lié à la charge attentionnelle en relation avec l'activité visuelle, examen qu'il conviendrait d'effectuer dans le cadre des futures évaluations en conduite réelle.

Ces évaluations pourront se faire dès les premiers tests de la rame prototype des futurs TGV, dès que plusieurs parcours auront été effectués dans le cadre des essais techniques.

6.4 Discussion sur les résultats de la phase d'évaluation globale du concept lié à la régulation de la vitesse

Il est apparu nécessaire de mettre en place une phase d'évaluation au cours de laquelle nous pouvons examiner certaines conditions d'exercice de l'activité proches de celles rencontrées dans des situations de conduite « normales ». En effet, contrairement aux tests de conception qui se focalisent sur un aspect particulier de l'interface, les mesures d'utilisabilité que nous avons effectuées lors de cette dernière évaluation constituent une évaluation globale du produit (SENACH, 1993).

La difficulté de cette étape reste de déterminer les variables critiques, qui caractérisent la facilité d'usage et d'utilisation du dispositif. Ici, nous avons tenté d'identifier les stratégies de conduite utilisées sur un parcours réel, afin de les comparer à celle adoptées lors de la conduite sur simulateur. Nous avons ainsi vérifié que le nouveau concept lié à la régulation de la vitesse ne modifie pas de manière fondamentale les stratégies actuellement mises en place par les conducteurs pour accomplir leur mission.

Suite à cette phase d'évaluation et en accord avec les travaux RIERA (1993) dans le domaine de l'automobile, nous pouvons confirmer ici que l'examen des stratégies de conduite élaborées par les conducteurs, fournissent des éléments pour l'évaluation ergonomique des nouveaux instruments de bord. La participation des conducteurs est ici essentielle, dans la mesure où leur connaissance du métier va influencer les stratégies de conduite futures.

Mais il faut préciser, que les validations effectuées ici, permettent de conclure que le concept est satisfaisant pour l'ensemble des acteurs du projet, dans la mesure où les validations effectuées sur simulateur ont été couplées à des données terrain (PACHIAUDI et coll., 1996). L'étude des situations réelles constitue en effet toujours la seule phase permettant de tester la pertinence des situations théoriques conçues au laboratoire, en vue de comprendre les situations réelles (HOC, 1996).

L'étude des situations simulées telle qu'elle a été menée ici, est une voie d'approche intéressante pour anticiper quelle sera l'activité des conducteurs en situations réelles. En effet,

étant donné que les dispositifs étudiés sont des organes principaux de conduite dont l'installation sur une rame prototype présente des risques élevés, elle a constitué une étape d'évaluation et de validation intermédiaire nécessaire au processus de conception. De plus, cette étape permet d'ors et déjà d'orienter les évaluations futures en situation de conduite réelle.

Ainsi, suite à cette phase d'évaluation, la décision d'implanter les nouveaux dispositifs sur le poste de conduite de la rame prototype d'un futur TGV a pu être prise par le groupe projet. Les dernières évaluations se dérouleront lors de l'étape de suivi de la réalisation du projet, en situation de conduite réelle.

7. DISCUSSION GENERALE SUR LA DEMARCHE DE SIMULATION DE L'ACTIVITE PROPOSEE

Nous avons pu constater lors de nos recherches concernant la simulation de l'activité, que l'utilisation des simulateurs reste d'un intérêt restreint pour la plupart des concepteurs (SANDERS, MC CORMICK, 1993). En fait, les simulations, qui ne prennent pas en compte tous les éléments de la situations réelle, ne semblent pas suffisamment réalistes aux yeux des concepteurs, qui pensent obtenir des relevés non pertinents concernant les performances des utilisateurs.

Or, lors du processus de conception, le propos de la simulation est de fournir les conditions nécessaires à la mise en évidence de la performance humaine très proche de ce qui pourrait être fait d'un point de vue opérationnel. Il est alors important de souligner (MEISTER, 1995):

- que les caractéristiques et les méthodes d'utilisation des simulateurs doivent être principalement basées sur des objectifs de mise en situation des utilisateurs,
- que le réalisme physique de la situation simulée n'est pas le seul moyen, ni même l'optimal, pour arriver à remplir des objectifs de fidélité en situation simulée.

Il faut examiner l'équivalence des situations de laboratoire et de terrain, ainsi que le niveau de fidélité du simulateur mis en place, d'un point de vue constructif et non plus d'un oeil critique. On peut par exemple parler d'équivalence par rapport aux mécanismes dans la mesure où les tâches terrain et laboratoire induisent une même activité (LEPLAT, 1978).

Dès lors, comme nous avons pu le montrer dans le cadre du projet TGV, les simulations apportent un grand nombre de réponses aux concepteurs, qui consolident leurs connaissances sur le système étudié. Il faut cependant bien identifier, pour chacune des étapes du projet, les buts recherchés au travers de l'examen des situations simulées, afin de cibler les actions justes nécessaire à réaliser concernant la mise en place des outils de simulation.

Nous nous proposons dans ce chapitre, de décrire la démarche simulation que nous préconisons dans le cadre de la conception d'un système complexe piloté par l'homme ainsi que les éléments nécessaires à sa mise en place. Nous soulignerons ensuite, les limites liées à la simulation de l'activité dans le cadre des projets de conception, puis nous discuterons des différents apports de cette démarche au niveau des utilisateurs, des concepteurs, et du projet de conception.

7.1 La démarche de simulation de l'activité

Nous avons montré au cours de nos travaux concernant le TGV NG, que la simulation de l'activité intervient à tous les niveaux du projet de conception, utilise différents outils (scénarios, bancs d'essais, simulateurs,...) et permet à l'ensemble des membres du groupe projet de coopérer et d'aboutir à un compromis concernant la solution à mettre en place.

Plus qu'un simple outil d'évaluation, la simulation doit donc faire l'objet de la mise en place d'une démarche spécifique lors des projets de conception de systèmes complexes pilotés par l'homme. C'est cette démarche, que nous nous proposons d'exposer dans la suite de ce chapitre.

En accord avec les différentes phases du processus de conception, cette démarche de simulation de l'activité comporte trois étapes :

? la définition du champ des activités futures souhaitables, en phase d'études préliminaires,
? l'évaluation fonctionnelle et opérationnelle des dispositifs en phase de définition des préconcepts,
? l'optimisation des dispositifs et l'évaluation de la performance du SHM lors de la phase d'études détaillées.

7.1.1 Définition du champ des activités futures souhaitables, en phase d'études préliminaires

La première étape de la démarche de simulation de l'activité est présente dès la phase d'études préliminaires du projet de conception. En effet, c'est au cours de cette phase que les membres du groupe projet doivent recueillir un maximum d'éléments concernant le projet à venir. Il faut s'intéresser aux systèmes existants, aux situations d'utilisations existantes,..., et dresser la liste des besoins nouveaux liés à l'utilisation des systèmes futurs.

Concernant plus spécifiquement la démarche de simulation de l'activité, il s'agit d'acquérir une bonne connaissance de l'activité réellement menée par les utilisateurs sur les produits existants et tenter d'en donner une représentation synthétique.

Cette étape donne lieu à des observations sur le terrain et à des verbalisations avec les utilisateurs actuels ou futurs des produits, afin de mettre en évidence, les situations d'actions caractéristiques, les problèmes actuels, les besoins futurs,...

Sur la base de ces premiers éléments issus de l'analyse de l'activité, il s'agit lors des réunions du groupe projet, de construire progressivement une représentation commune du rôle qu'auront les futurs utilisateurs. Le groupe projet doit ainsi définir, ce que nous avons appelé **le champ des activités futures souhaitables des utilisateurs**, souhaitables en terme de sécurité, de confort et d'efficacité (SAGOT et coll., 1997). On fait ainsi dans un premier temps abstraction des contraintes techniques, organisationnelles, économiques,...., pour réfléchir en commun sur le déroulement de actions futures des utilisateurs. La définition du champ des activités futures souhaitables, permet par la suite, à chaque acteur du projet, de se référer à l'utilisation future du produit et non pas uniquement aux connaissances propres à son domaine de compétences.

Ainsi, après avoir défini la place assignée à l'homme dans le futur système Homme-Machine, la répartition des tâches Homme-Machine,...le groupe projet peut cibler les actions à mener prioritairement dans le cadre de la conception du système futur. Les différents spécialistes du groupe projet, peuvent alors réaliser le cahier des charges fonctionnel, définir les recommandations ergonomiques et mettre en évidence des principes techniques envisageables, tout en gardant à l'esprit la définition du champ des activités futures souhaitables, qui servira de référence commune au groupe, tout au long du projet.

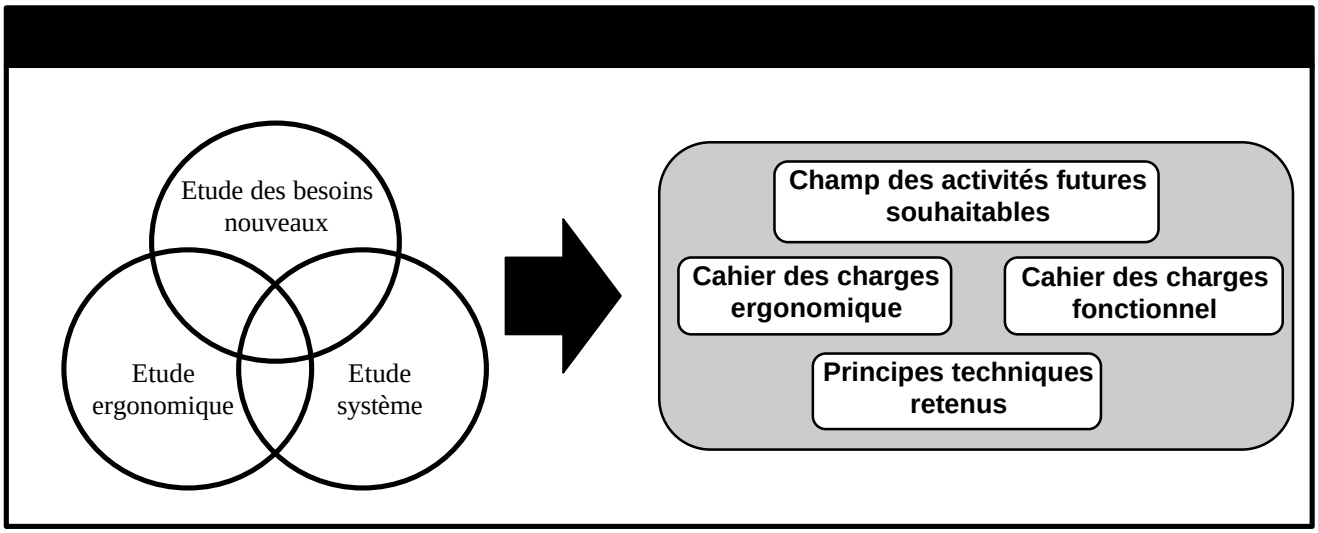


Figure 92 :Mise en évidence du champ des activités futures souhaitables, en phase d'études préliminaires.

7.1.2 Evaluations fonctionnelles et opérationnelles des dispositifs en phase de définition des préconcepts.

Lors de l'étape de définition des préconcepts, il s'agit d'identifier avec les utilisateurs actuels ou futurs des produits, des situations d'actions caractéristiques liées à l'utilisation des dispositifs. Ces situations qui décrivent certaines conditions d'exercice de l'activité des utilisateurs, donnent lieu à l'élaboration de scénarios, qui permettent d'identifier finement les actions à réaliser par les utilisateurs. Ces scénarios d'utilisation viennent ainsi compléter les données issues des études préliminaires (Cahier des charges, principes techniques,...), et permettent d'envisager des préconcepts en adéquations avec les tâches à réaliser. On contribue ainsi à une certaine forme d'innovation, dans la mesure où les réflexions ne s'appuient pas sur d'anciens concepts mis en place, mais sur les scénarios d'utilisation.

Plusieurs préconcepts sont alors définis et réalisés sous forme de maquettes, afin d'être évalués d'un point de vue fonctionnel et opérationnel, lors de simulations sur bancs d'essais. Ces simulations, même si elles ne reproduisent que partiellement l'activité d'utilisation, permettent l'obtention de spécifications techniques tenant compte de l'usage, et la vérification de certaines hypothèses concernant le champ des activités futures souhaitables. Ainsi, lors d'itérations successives, le groupe projet fait évoluer les préconcepts, les évalue et les compare, afin de retenir un concept qui constitue le meilleur compromis possible au regard des exigences techniques, fonctionnelles, opérationnelles,...

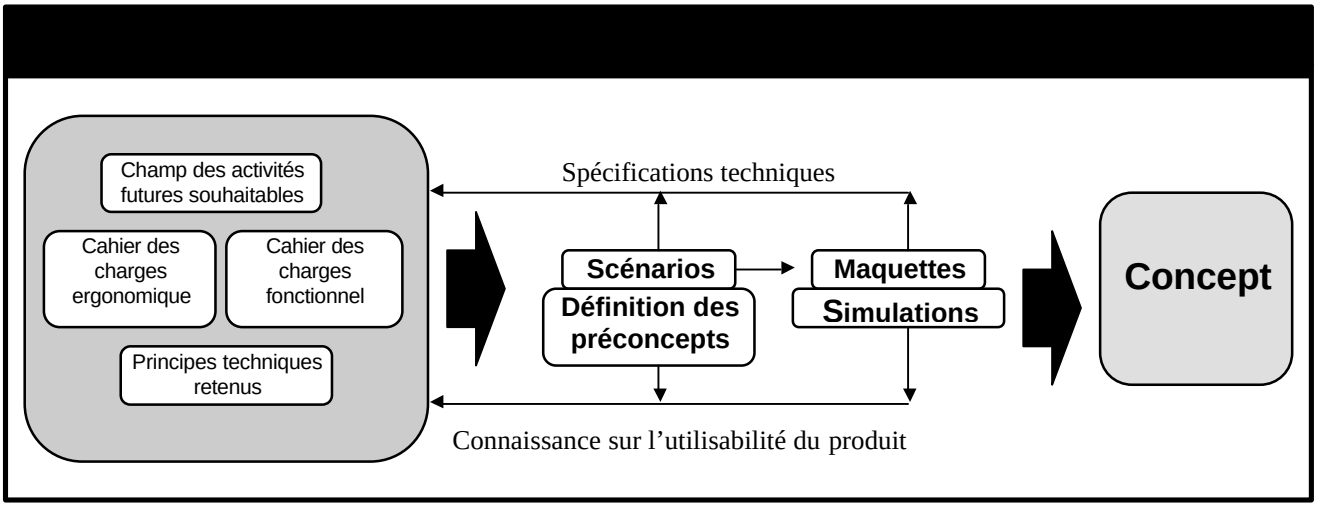


Figure 93 : Les évaluations fonctionnelles et opérationnelles en phase de définition des préconcepts.

7.1.3 Optimisation des dispositifs et évaluation de la performance du système Homme-Machine lors de la phase d'études détaillées.

Lors de la phase d'**études détaillées,** il s'agit de mettre en place un outil d'évaluation permettant de prendre en compte de la manière la plus large possible l'activité qui découle de l'utilisation des futurs dispositifs. Cet outil de simulation, que nous appelons « simulateur d'étude et de conception », doit regrouper l'ensemble des dispositifs étudiés, reproduire le comportement réel des éléments qui interagissent avec le système et recréer les éléments de l'environnement d'utilisation qui vont influencer l'activité des utilisateurs. On peut ainsi tester avec les utilisateurs futurs, certaines conditions d'exercice de l'activité, sur la base de la mise en place de scénarios reproduisant des situations d'actions caractéristiques, ou des situations spécifiques pour tester des cas d'utilisation en situation dégradée.

Suite à une **pré-expérimentation** sur le simulateur**,** qui sert de phase de familiarisation aux les utilisateurs, et qui permet d'effectuer les ajustements de l'outil de simulation, deux types d'évaluations doivent être effectuées :

? il faut vérifier **l'adéquation tâche/moyens de réalisation de la tâche**, en demandant aux utilisateurs de réaliser des scénarios « imposés », au cours desquels ils respectent des consignes, permettant d'évaluer des cas limites d'utilisation (fréquence d'actions élevées, surcharge d'informations, incidents,....). Cette phase d'évaluation intrinsèque du concept global, permet d'optimiser chaque dispositif, en fonction des dysfonctionnements observés (limites techniques, mémoire,...). Cette étape d'évaluation, peut permettre de rassurer l'ensemble des acteurs du groupe projet dans la mesure où elle donne certaines indications sur les situations d'utilisation dites critiques,

? on va ensuite chercher à identifier les stratégies mises en oeuvre par les utilisateurs pour effectuer l'**évaluation globale du concept retenu,** en contexte de conduite simulée**.** Ici, les utilisateurs mènent leur activité à l'aide des nouveaux dispositifs, lors d'un scénario dit « de conduite libre », qui reproduit des situations d'actions caractéristiques. On cherche ici à identifier les stratégies de conduites mise en oeuvre, pour les comparer celles identifiées lors des études préliminaires. On vérifie alors que ces stratégies, même si elles sont différentes des stratégies actuelles, permettent l'obtention de performances similaires.

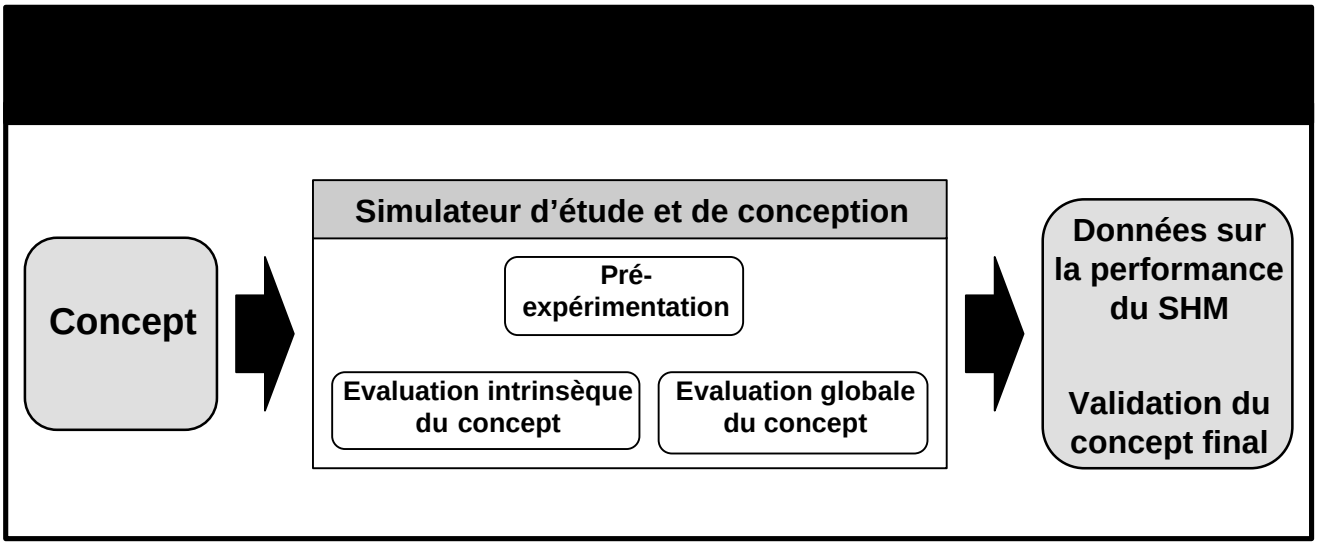


Figure 94 : L'optimisation des dispositifs et l'évaluation de la performance du système Homme-Machine, lors des études détaillées.

En fait, il s'agit lors de cette étape de reproduire un grand nombre de conditions d'exercice de l'activité, pour évaluer l'utilisabilité et la compréhension du nouveau système réalisé. On peut ainsi valider le concept final, et son implantation dans un contexte d'utilisation réel. Les données sur la performance du système Homme-Machine, obtenues lors des simulations, permettent alors d'orienter les futures évaluations en situation d'utilisation réelle.

7.1.4 Intérêts d'une telle démarche

La démarche de simulation de l'activité présentée ci-dessus, permet de créer une cohérence au sein du groupe projet en proposant à la fois des outils de travail et des outils de dialogue entre tous les acteurs du projet. On contribue ainsi à **l'innovation et à la créativité** concernant la conception des produits complexes pilotés par l'homme, en adoptant une démarche **pluridisciplinaire** intégrant de nombreux métiers (technique, ergonomie, esthétique,...). L'application de cette démarche permet également **d'optimiser le processus de conception** en termes de coûts, de délais, de qualité, par le biais d'une meilleure prise en compte de la coopération homme machine. Ainsi, nos travaux, permettent de vérifier que les apports liés à l'utilisation d'une démarche de simulation pour la conception sont multiples et concernent à la fois les concepteurs, les utilisateurs et le projet de conception qui l'intègre (Figure 95).

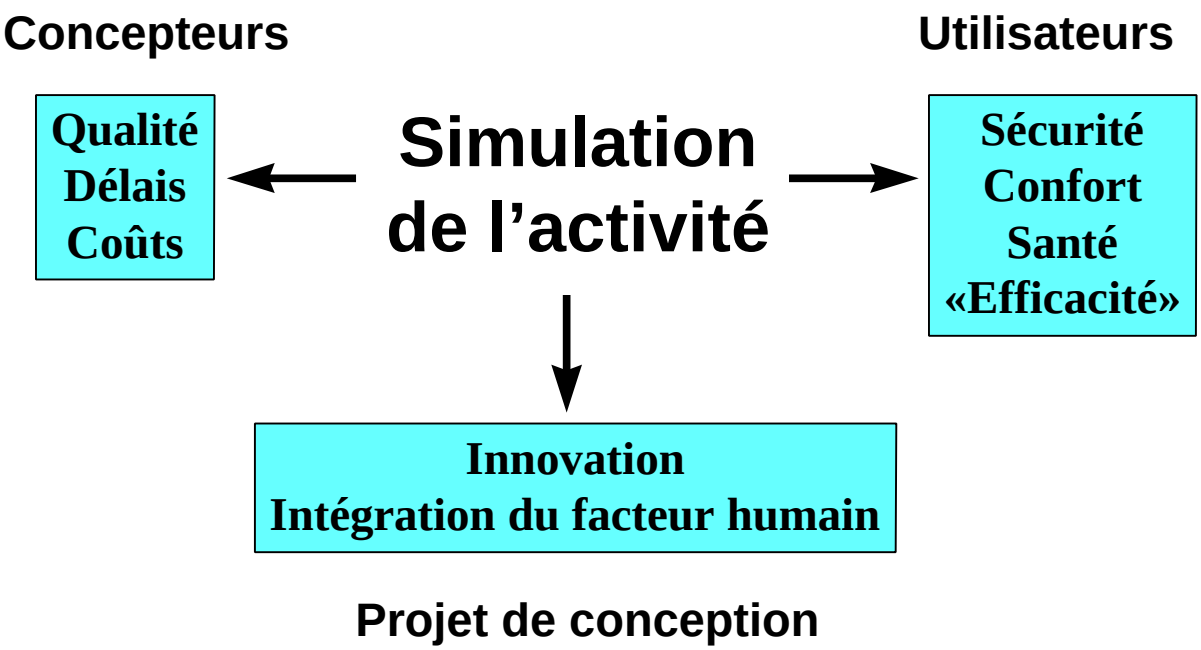


Figure 95 : Apports de la simulation de l'activité aux concepteurs, aux utilisateurs et au projet de conception.

Ce sont ces différents apports qui vont maintenant être discutés, suite à la mise en évidence des limites de la démarche de simulation de l'activité, dans les projets de conception.

7.2 Limites de la simulation de l'activité dans les projets de conception.

La création de modèles et la simulation, comptent au nombre des méthodes les plus largement utilisées par l'approche systémique (DURAND, 1979). En effet, la construction de modèles analogiques simples devient rapidement impraticable lorsqu'un grand nombre de variables entrent en jeu, comme dans le cas des systèmes de haute complexité. Il faut alors utiliser des simulateurs ou des ordinateurs pour faire vivre un système en permettant le jeu simultané de plusieurs de ses variables. Mais, comme le souligne FORET (1987) la simulation de l'activité n'est qu'une méthode complémentaire d'étude des systèmes complexes. Elle ne donne jamais l'optimum ou la solution exacte à un problème donné puisqu'elle ne fait que dégager les tendances générales du comportement d'un système, ses directions probables d'évolution; tout en suggérant de nouvelles hypothèses. Il s'agit donc de ne pas se perdre dans l'infinité des variables et des comportements associés à des modifications aléatoires effectuées « pour voir ».

Si la modélisation par des outils tels que les réseaux de PETRI permettent à un niveau donné, d'identifier de manière rigoureuse les besoins informationnels des opérateurs (BENAISSA, 1993 ; ABED, 1990), ceci est pratiquement impossible si l'on regarde d'un point de vue global l'activité de conduite. Obtenir un modèle précis de toutes les composantes de l'activité serait un travail absolument fastidieux et le résultat serait difficilement exploitable dans le cadre de la reconception globale d'une activité de travail complexe. L'intérêt de la simulation de l'activité dans les projets de conception se limite donc à l'obtention d'une évaluation rapide, et ne permettra pas à notre sens la création de modèles fins de l'activité.

De plus, si le principal avantage des simulateurs, dans l'étude des comportements humains, est la reproductibilité des situations, sans risque (NILSSON, 1995), le principal désavantage est que la question de la validité du simulateur reste posée. Ici, c'est principalement l'équivalence en terme de reproduction de certaines conditions d'exercice de l'activité qui a été obtenue pour la mise en situation des sujets. Il semble bien entendu logique au niveau des développements que plus le simulateur se rapproche du système réel, plus on pourra avoir confiance dans le fait que les performances de chacun, incluant l'apprentissage, seront équivalentes aux performances du système, mais le coût d'une reproduction fine de l'environnement peut largement dépasser le coût issu du besoin de simuler. C'est pour cette raison que nous avons avant tout cherché à déterminer comment être éloigné d'un réalisme absolu de la situation sans pour autant réduire les valeurs liées à la performance. Ainsi, nous nous sommes attachés à ne reproduire que certaines conditions d'exercices de l'activité, qui nous ont paru essentielles et qui ont été identifiées sur la base de l'analyse de l'activité réelle.

De toute façon, l'isolement du problème en laboratoire ne peut que le transformer, et la question fondamentale est alors de savoir si la situation choisie et isolée conserve bien son identité. Est-elle bien une composante de la situation globale ? Il s'agit donc de trouver les différences qui font une différence (FROMKIN et STREUFERT, 1976), afin d'évaluer l'incidence qu'elles ont sur les questions étudiées.

Pour certaines études, de nombreux facteurs plus proprement liés à l'homme ne pourront pas être pris en compte en laboratoire. LEPLAT (1978), met en évidence le fait que le sujet perd au cours des simulations en laboratoire, le caractère social, lié à son métier, et ne réalise pas son activité comme il aurait pu la réaliser sur le terrain. FAVERGE (1969) parle du sujet

qui « vient sous la coupe de l'expérimentateur, sachant que l'on n'attend plus de lui les mêmes choses, adoptant d'autres objectifs, en somme considérant qu'il se livre à une activité ludique en ce sens qu'elle ne compte pas, substitut de l'activité réelle, ayant de nouvelles règles et conventions ».

Les résultats de la simulation ne doivent donc pas être confondus avec ceux de la réalité, ce qui est bien souvent le cas. Ils doivent pouvoir être comparés à ce que l'on sait de la réalité, pour servir de base à une modification éventuelle du modèle de départ. C'est ainsi à la suite d'un processus itératif, par évaluations successives, que se révèle l'utilité de la simulation. L'écart entre le prescrit et le réel existera toujours et heureusement, car c'est le degré d'autonomie de l'opérateur qui est préservé. Il faut donc toujours passer par le terrain en final pour mesurer cet écart et apprendre à le gérer (FRIEDBERG, 1994).

7.3 Intérêt de la simulation pour les utilisateurs

L'utilisateur dans les projets de conception ne doit plus seulement être vu comme un sujet du genre humain à respecter au mieux - ce qu'il fallait et qu'il faut toujours faire - mais comme un acteur couplé à une réalité complexe. En effet, même si l'aspect normatif de l'ergonomie contribue au respect de la **sécurité**, de la **santé**, et du **confort** des utilisateurs, celui-ci n'apporte pas toutes les réponses attendues par les utilisateurs. C'est une ergonomie totale ou globale qui doit donc être mise en oeuvre afin de la rendre efficace (AMALBERTI, 1997). L'ergonome doit apporter un savoir faire, dans la participation au processus de conception, concernant les méthodes d'évaluation, l'intégration des utilisateurs finaux lors des évaluations intermédiaires du système en cours de développement,.... La démarche de simulation de l'activité telle que nous l'avons menée, a permis de favoriser cette approche ergonomique globale et ce tout au long du projet de conception. On a ainsi pu respecter les critères de **sécurité**, de **confort** et de **santé** des utilisateurs, tout en assurant une réelle **efficacité** du système conducteur poste de conduite étudié.

La démarche de simulation a favorisé l'intégration de l'intelligence et des savoir faire non formalisés des opérateurs. Cette démarche s'est ainsi opposée à une démarche de technical push, qui bien souvent provoque chez les usagers une forte résistance au changement (D'IRIBARNE, 1994). L'utilisateur en devenant co-concepteur de la technologie a permis

d’élargir les points de vue des anciens acteurs de la conception et d’accéder à l’innovation bien au delà de la technologie. La participation des conducteurs nous a permis de tirer profit des connaissances que ceux-ci mettent en oeuvre lors de la prise en main des nouveaux dispositifs, lors de la prise de connaissance de leur nouvelle tâche. En effet, l’activité est un processus d’interaction intelligent d’un opérateur avec les exigences de sa tâche, les contraintes de l’environnement, son état interne, ses objectifs individuels, et elle résulte d’une construction personnelle à celui-ci. (FALZON et TEIGER, 1995). L’opérateur est donc amené au cours du projet à reconstruire son activité, mais il n’est pas réellement conscient des connaissances qu’il met en oeuvre lors de cette reconstruction. Il est donc intéressant pour l’ergonome de faire prendre conscience à l’opérateur de cette reconstruction de l’activité au cours d’un dialogue qui permet de confronter deux points de vue et deux types de connaissances. L’activité de travail n’est donc plus un objet donné, mais un objet à reconstituer en commun, dans un processus de co-construction de la représentation de l’activité et de ses conséquences ressenties sur la santé et la vie hors travail. Cela permet à l’ergonome une connaissance encore plus forte de l’activité mise en oeuvre ainsi qu’une meilleure compréhension du métier.

Ceci est particulièrement intéressant, dans la mesure où l’opérateur acquiert ainsi une propre maîtrise de son activité et une connaissance de soi dans l’action qui est un élément de progrès individuel. De plus, la compréhension de son propre travail peut permettre à chacun et au collectif de fonctionner mieux en termes d’efficacité, d’efficience et de fiabilité. Nous voyons donc ici que l’aspect participatif du projet, contribue à faire évoluer les solutions à mettre en oeuvre, mais également les solutions mises en oeuvres, au travers des connaissances de l'utilisateur.

7.4 Intérêt de la simulation pour les concepteurs

Dans le cas des systèmes de haute complexité, on est en présence d’éléments de grande diversité liés par de fortes interactions (DE ROSNAY, 1975). On doit donc ici avoir recours à des méthodes nouvelles comme celles que regroupe l’approche systémique. Le but est alors de considérer le système dans sa totalité, sa complexité, et sa dynamique propre. Dans l’approche systémique de la conception, la simulation apparaît comme un des outils les plus fécond. Elle permet de vérifier les effets d’un grand nombre de variables sur le fonctionnement global d’un système, de hiérarchiser le rôle de chaque variable, de détecter les points grâce auxquels on

peut influencer le comportement du système pour le modifier ou en concevoir d'autres. Lors du projet TGV les concepteurs ont pu tester différentes hypothèses sans prendre le risque de détruire leur système et minimiser les **coûts** de mobilisation ou de dégradation des dispositifs étudiés. Nous avons également pu, dans la mesure où nous avons travaillé sur des modèles de la réalité, accélérer le processus d'évaluation en agissant sur la variable temps (accélérer ou ralentir des phénomènes), sur la variable espace.

Ainsi, nous avons de nouveau réduit les coûts liés aux temps de développement au travers de la réduction des **délais** d'obtention des résultats. De plus, en accord avec ALIOTTI (1993), nous pensons que la simulation est devenue un point de passage obligé dans la conception des systèmes complexes, dans la mesure où il n'existera pas une certaine assurance de n'avoir négligé aucun facteur significatif dans la représentation fonctionnelle du système si l'on n'effectue pas de simulations globales. La simulation de l'activité apporte ici un certain gage de **qualité** des dispositifs développés, étudié dans leur relation avec les futurs utilisateurs. En effet, l'usage déborde souvent largement la fonction pour laquelle l'objet a été conçu. Il s'agit donc pour les concepteurs d'examiner lors de la démarche de simulation, les problèmes d'interactions peu prévisibles entre l'utilisateur et l'objet. L'analyse bibliographique et le recours aux experts leur apparaît toujours comme nécessaire en préalable à l'analyse de l'usage, mais le recours aux tests est nécessaire dans la mesure où les concepteurs ne peuvent pas simuler eux-mêmes l'usage » (DUBUISSON, HENNION, 1996). Ainsi, la simulation de l'activité représente pour les concepteurs un nouvel outil d'aide à la décision leur permettant d'effectuer des choix sur des « futurs possibles », de concrétiser des modes d'utilisation futurs possibles, tout en contribuant dans une certaine mesure à respecter les critères liés à la qualité, aux coûts, et aux délais.

7.5 Intérêt de la simulation dans le projet de conception

La démarche de simulation de l'activité permet **d'intégrer l'utilisateur** dans le projet de conception, ainsi l'analyse des besoins de l'utilisateur ne se trouve plus à la remorque de la technique, même si celle-ci a des effets novateurs (MALATERRE et SAAD, 1986). Elle reste un instrument au service de nos stratégies et c'est ce service dont a besoin l'utilisateur. Par l'intégration du facteur humain dans le projet de conception, la technique devient efficace dans la mesure où l'on mobilise ici suffisamment l'intelligence et la volonté créatrice des hommes.

De plus, la démarche de simulation permet d'intégrer le facteur humain non plus comme une contrainte mais comme un facteur d'innovation. En effet, GUIDAT (1997) a défini les sciences de l'innovation comme étant « une science de l'action, à l'interface des sciences de l'ingénieur et des sciences de l'homme, permettant de piloter l'ensemble des interactions qui gouvernent les systèmes industriels au niveau de leur conception, leur mise en place et leur conduite. La démarche de simulation apparaît donc comme pertinente en vue d'effectuer les liens entre ces domaines et ainsi de **favoriser l'innovation** au sein des processus de conception. Il est vrai que bien souvent, les ingénieurs ont du mal à comprendre l'étroite relation entre les activités créatives et les activités analytiques. Le processus de conception se trouve ainsi généralement limité à un problème de dimensionnement. Ceci est en particulier dû au fait que l'on enseigne une approche déductive sur l'analyse d'un concept mais pas sur sa génération (RAUCENT et JOHNSON, 1997). Or, nous avons pu montrer que la modélisation et la simulation peuvent être intégrées dans le processus de conception et que ces techniques sont particulièrement adaptées dans le cadre de la conception d'un système complexe piloté par l'homme.

VIDAL (1995), qui s'est longuement intéressée aux techniques de créativité au japon souligne que *« la naissance d'un objet est toujours chose complexe. L'apparition du nouveau est toujours liée à tout un travail conscient et inconscient où interviennent les passions des individus, leur rêves, l'attention qu'ils portent au réel, les incitations venues du milieu socioculturel et aussi les jeux des rencontres et du hasard. ».* Suite à ce constat, nous pensons qu'il faut généraliser la démarche de simulation de l'activité au sein des processus de conception. En effet, elle constitue pour nous un moyen pertinent pour maîtriser la complexité, favoriser la mise en commun des connaissances de chacun des acteurs du projet, guider les choix et limiter le hasard par la mise en évidence du champ des activités futures possibles lié à la création des futures situations d'utilisation des dispositifs.

7.6 Perspectives

Nous avons pu vérifier au cours de nos travaux que l'évaluation des interfaces homme machine est nécessaire pour une bonne conception des systèmes et pour valider leur fonctionnement en situation opérationnelle. Cette évaluation doit être menée dès les premières études conceptuelles et se poursuivre durant les différentes phases de conception jusqu'à l'obtention du produit opérationnel. Nous pensons au terme de cette étude, qu'il serait

envisageable de mettre en place des plans d'expériences spécifiques, liés à l'évaluation d'un nouveau dispositif en situation de conduite simulée.

En s'appuyant sur les résultats de nos recherches prospectives dans le domaine de l'évaluation des performances en conduite ferroviaire simulée, nous pourrions mettre en place des plans d'expérience spécifique qui, appliqué à différents concepts liés à la conduite considérés comme des boites noires (ALEXIS, 1990), permettrait d'apporter des conclusions rapides sur l'acceptabilité des solutions. Ces plans d'expérience favoriseraient l'articulation entre recherche fondamentale et recherche appliquée, en permettant d'aider la conception et l'implantation des nouvelles technologies. Ainsi, la recherche sur le terrain bénéficierait des apports théoriques, et l'intervention sur le terrain pourrait émuler des recherches en laboratoire (PERUCH et coll., 1988). Les évaluations telles qu'elles sont menées dans le cadre de la simulation permettraient d'orienter les évaluations futures en situation de conduite réelle et feraient ainsi gagner un temps précieux au niveau des essais simulés ou réels.

COFFIN (1995) a mis en place une méthodologie de conception coopérative de produits complexe dans le domaine de la conduite automobile et s'est appuyé sur différentes évaluations. Mais comme le souligne PLECZON (1992), il n'existe toujours pas de procédure d'évaluation adaptée à toutes les étapes du processus de conception, mais un ensemble de méthodes permettant de répondre aux besoins spécifiques de chaque étape.

En développant les plans d'expérience au cours des recherches dans le domaine des produits complexes (ferroviaire, automobile, conduite des systèmes à risque,...), on pourrait favoriser la contribution de chacun à la recherche appliquée dans le domaine des interactions homme-machine.

Ceci est d'autant plus intéressant qu'il nous semble que la simulation de l'activité va concerner de nombreux domaines dans le futur. Un des domaines qui nous semble le plus en devenir est celui de l'organisation de la production. En effet, comme le souligne LENCLUD (1993), l'évolution de l'entreprise et de son système de production conduit ces systèmes à une complexité croissante. Cette complexité nécessite de la part des acteurs d'un système de production, de disposer de moyens d'action et/ou d'investigation adéquats pour l'étude de ces systèmes. Il propose donc la simulation, qui permet une analyse dynamique et une évaluation

sans risque financier ou physique important et ce tout au long du cycle de vie du système de production.

Au cours d'un projet de réorganisation et de réimplantation de postes de travail (SAGOT, ZWOLINSKI, 1996), nous avons déjà pu mettre en évidence les apports considérables que l'on peut attendre d'une démarche de simulation qui dans ce cas s'appuie sur des techniques de représentation virtuelle des produits et des opérateurs. De la même manière que pour l'étude du poste de conduite des futurs TGV, un bilan complet de la situation concernant l'organisation et les conditions de travail a été établi. Par la suite, une étude ergonomique approfondie de l'activité de travail existante et des facteurs particuliers considérés comme prioritaires, sur la base du bilan précédent, a été menée. C'est sur la base de la définition du champ des activités futures souhaitables des opérateurs que des solutions d'implantation d'atelier ainsi que des solutions concernant la conception des postes futurs ont été proposées. La validation de ces propositions a alors été rendue possible par le biais de simulations dynamiques des installations futures en images de synthèse, qui se sont révélés être des outils de communication très utile dans le cadre d'un tel projet. La **simulation dynamique** a permis par exemple au groupe de travail de "circuler visuellement" à l'intérieur de la future installation. Ces réalisations ont été construites à partir de scénarios regroupant l'ensemble des éléments relatifs aux tâches à accomplir dans l'atelier, au déroulement temporel et à l'organisation envisagée.

L'utilisation d'outils d'imagerie de synthèse, qui ont permis de recréer virtuellement et numériquement les caractéristiques de l'environnement, des postes de travail, des circulations des produits, et des personnes,..., existants et futurs, ont été particulièrement précieux dans le processus de conception (Figure 96). Ces images virtuelles ont en effet facilité les analyses, le dialogue entre les différents partenaires, et apporté une grande crédibilité à notre démarche et à nos résultats. En effet, bien souvent la conception d'espaces appropriés aux objectifs recherchés pour le travail se heurte à l'absence de notion d'espace, celui-ci se réduisant à de simples schémas fonctionnels (LAUTIER et TESSIER, 1994). Par la simulation, il est possible de définir des espaces de travail qui ne soient pas de simples résultats de contraintes et d'habitudes, d'organisations des dispositifs de production, mais qui, intégrant d'autres dimensions et d'autres intentions, soient l'objet de négociations, de décisions, de conception et au delà, peut être de gestion (ZWOLINSKI, 1995).

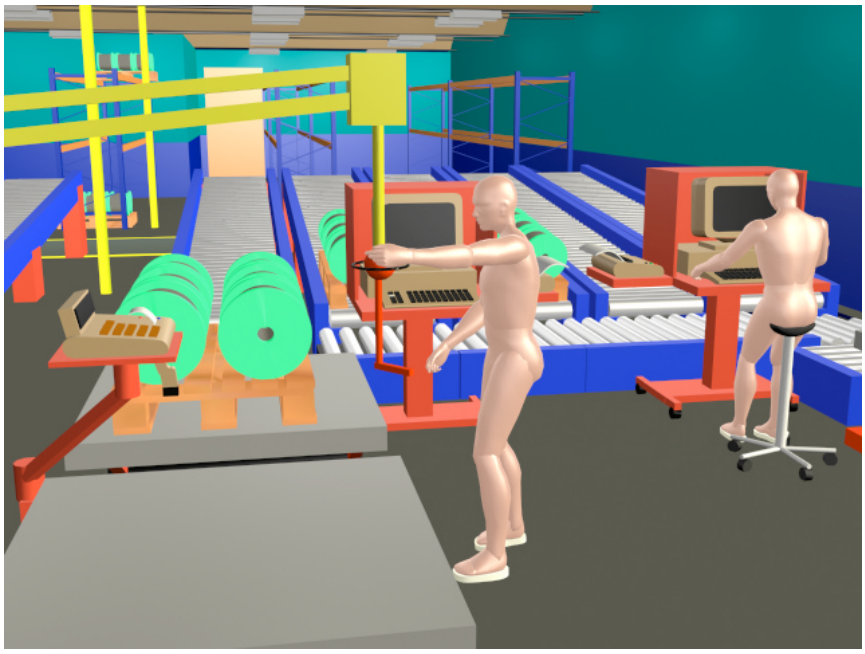


Figure 96 : Préconcept d'implantation de poste de travail

En accord avec les travaux de GOMES (1998), nous pensons également que l'utilisation de la simulation virtuelle de l'activité va favoriser l'intégration des résultats de l'analyse de l'activité, tout en accélérant les évaluations itératives des nouveaux dispositifs. Ainsi, on pourra favoriser la prise en compte simultanée des contraintes normatives ainsi que de certaines composantes de l'activité, en vue d'accélérer l'étape de définition des préconcepts, de valider les choix des concepteurs dès les étapes préliminaires de la conception, tout en réduisant les durées des phases d'évaluation sur prototype réel.

Les apports liés à l'utilisation de la simulation de l'activité étant aujourd'hui largement mis en évidence et les techniques de simulation ou de représentation virtuelle d'environnement,...., ne cessant d'évoluer, il nous semble important aujourd'hui d'étendre l'utilisation de la simulation de l'activité (virtuelle ou réelle) à de nombreux domaines et de développer les techniques et méthodes qui vont contribuer à la généralisation de l'intégration de la simulation de l'activité dans les processus de conception.

8. CONCLUSION

Conclusion

Les résultats présentés dans ce travail de synthèse mettent en évidence l'intérêt de la simulation de l'activité au cours du projet de conception. L'application au projet de conception de la cabine de conduite des TGV futurs, a permis d'illustrer par un certain nombre d'exemples les différentes techniques pouvant être utilisées dans le cadre de la simulation de l'activité.

Dans le premier chapitre, nous avons montré la nécessité de mettre en place une **démarche de simulation de l'activité** et des **moyens d'actions dans la conception** communs aux différents acteurs d'un projet de conception. En effet, il s'agit aujourd'hui de favoriser, d'intégrer et de valider les recommandations de chacun des acteurs d'un groupe projet lors de la conception d'un système complexe innovant. Les méthodes de conception, la technique et l'intégration de l'ergonomie dans le processus de conception, permettent à ce jour de ne réaliser que partiellement ces objectifs.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté notre application : le poste de conduite du TGV. La démarche de simulation de l'activité reposant en particulier sur une bonne connaissance du métier des conducteurs de TGV, nous avons dressé le bilan de l'existant. C'est sur la base de ce bilan de l'existant, que le groupe projet a pu **définir le champ des activités futures souhaitables** des conducteurs, qui constitue la première représentation commune au groupe projet des problèmes existants et des solutions envisageables.

En prenant en compte cette définition du champ des activités futures souhaitables, nous avons au cours du troisième chapitre développé les préconcepts des dispositifs en cabine liés à la régulation de la vitesse. Ici, la simulation partielle de l'activité, rendue possible par l'utilisation de bancs d'essai, a favorisé la conception en proposant des **évaluations fonctionnelles et opérationnelles des préconcepts** de dispositifs de conduite. La simulation partielle de l'activité a ici permis d'apporter des éléments complémentaires à la définition des préconcepts en précisant ou en confortant des éléments liés aux normes ou au champ des activités futures souhaitables.

Cette phase nous a amené à mettre en place une phase d'expérimentation sur un simulateur d'étude et de conception présenté chapitre 4. Ce simulateur d'étude et de conception nous a permis de réaliser la phase d'évaluation intrinsèque des dispositifs en situation de conduite

simulée (chapitre 5) ainsi que la phase de simulation globale de l'activité (chapitre 5) au cours de laquelle nous avons pu **optimiser le système global**, **évaluer la performance du système conducteur-poste de conduite** retenu et **valider** les différents choix du groupe projet.

Suite à cette dernière étape présentée, il devra nécessairement être effectué une phase de validation sur le terrain, qui sera prochainement réalisée sur une rame prototype de TGV futur.

Au terme de cette étude, nous pouvons formuler les conclusions suivantes :

- L'approche systémique est favorisée par la démarche de simulation de l'activité reposant sur la mise en évidence de l'activité actuelle et future. Cette approche couplée à une décomposition par niveau du système permet de structurer progressivement les étapes de la conception.
- La mise en place d'outils de simulation communs aux membres du groupe projet favorise l'aspect participatif propre aux nouvelles méthodes de conception, en particulier à l'ingénierie simultanée.
- L'intégration de la simulation de l'activité aux différentes étapes du projet de conception de la cabine de conduite des TGV futurs a contribué :
  - au niveau des concepteurs, à respecter les critères de qualité, de coût et de délais concernant le produit final,
  - au niveau des utilisateurs, à respecter les critères ergonomiques de sécurité, de confort et de respect de la santé, tout en assurant une réelle efficacité du système homme-machine,
  - au niveau du projet, à favoriser l'innovation par l'intégration du facteur humain.

Les résultats obtenus permettent ici d'envisager un certain nombre de perspectives d'extension des travaux que nous avons présentés. En effet, de nombreuses applications peuvent faire l'objet d'une telle démarche. Les postes de conduite de véhicules routiers par exemple, ou des postes de contrôle de processus continus, pour lesquels jusqu'à présent, des simulations sont effectuées uniquement dans un but de validation et non de conception.

Il semble également intéressant de mettre en place une telle démarche pour la conception d'outils de production (ateliers, bâtiments,...) pour lesquels on emploierait une démarche

identique, en utilisant un simulateur d'environnement virtuel du fait de la taille des structures étudiées.

La simulation de l'activité constitue un réel moyen d'action dans la conception si elle est intégrée tout au long du processus de conception de systèmes complexes où intervient l'homme. Elle constitue une véritable aide dans la conduite du projet et favorise pleinement la démarche participative des groupes de projet ainsi que l'innovation.

9. BIBLIOGRAPHIE

-A-

ABED M., 1990.
Contribution à la modélisation de la tâche par des outils de spécification exploitant les mouvements oculaires. Application à la conception et à l'évaluation des interfaces homme-machine. Thèse de doctorat, université de Valenciennes, 1991.

ALEXIS J., 1990.
Pratique industrielle de la méthode Taguchi. Les plans d'expérience.170p.

ALIOTTI P., 1993.
Pour l'aide à la conception des systèmes d'armes, les besoins et les outils nécessaires en simulation. Dans Science et défense 93. Nouvelles avancées scientifiques et techniques. Simulation - simulateurs. Ministère de la Défense aux éditions DUNOD, 219-229.

AMALBERTI R., 1996.
La conduite de systèmes à risque, PUF, collection le travail humain, 239p.

AMALBERTI R., 1997.
L'ergonomie : facteur de sécurité et d'innovation. REE N°2, Février 1997, 69-75.

ANTIN J.F., LAURETTA D.J.,.WOLF L.D., 1991.
The intensity of auditory warning tones in the automobile environment : detection and preference evaluations. Applied ergonomics, 22.1,13-19.

AOUSSAT A., 1990.
La pertinence en innovation : nécessité d'une approche plurielle, Thèse de doctorat, ENSAM Paris.

ARNOULD C., 1995.
Pour une meilleure prise en compte de l'ergonomie et du Design dans les processus de développement de produit. Thèse de Doctorat, INPL Nancy, 250p.

-B-

BEEVIS D., ST DENIS G., 1992.
Rapid prototyping and the human factors engineering process Applied ergonomics, vol 23, n°3 june, 155-160.

BEGUIN P, WEILL-FASSINA A., 1997.
De la simulation des situations de travail à la situation de simulation. in La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir. Octarès Editions, 5-28.

BENAISSA M., 1993.
Une démarche de conception, réalisation et évaluation d'IHM : Application au projet ferroviaire ASTREE. Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut - Cambrésis, 130p.

BENCHEKROUN M., 1991.

Etude des interactions Homme-machine, poste de conduite TGV A. Rapport de fin d'études, UTCS, Printemps 1991, 68p.

BENCHEKROUN M., SAGOT J.C., 1992.
Conception ergonomique du poste de conduite du TGV Nouvelle Génération. Quatrième phase d'étude : Conception assistée par ordinateur, analyse, simulations et préconcepts. Rapport intermédiaire contrat PERSEE-GEC ALSTHOM, 32p.

BENCHEKROUN M., ROBERTY M.L., SAGOT J.C., 1994.
Conception ergonomique du poste de conduite du TGV Nouvelle Génération : Cinquième phase d'étude : Conception de la future interface homme-machine. Rapport final, contrat PERSEE-GEC ALSTHOM, 122p.

BENCHEKROUN M., SAGOT J.C., 1995.
Projet TGV NG. Interface homme-machine. Rapport intermédiaire, contrat PERSEE-SNCF, 22p.

BENCHEKROUN M., FRANCK N., GOMES S., SAGOT J.C., 1996.
Conception des pupitres futurs, conduite grandes lignes. Rapport final, contrat PERSEE-GEC ALSTHOM, 81p.

BOCQUET J.C., 1996.
Conception en mécanique industrielle. Sous la direction de C. BARLIER. Partie 3 : Maîtriser la conception des produits et des systèmes. Les référentiels DUNOD, 57p.

BOLLON T., SAGOT J.C., BENCHEKROUN M., 1992.
Conception ergonomique du poste de conduite du TGV Nouvelle Génération. Troisième phase d'étude : Analyse de la tâche et étude du comportement de conduite du mécanicien. Rapport final, contrat PERSEE-GEC ALSTHOM, 90p.

BRADLEY N.S., 1993.
Les générateurs de tests d'interfaces homme-machine : une solution pour accélerer les opérations de test. Génie logiciel et systèmes experts, n°32, septembre, 40-46.

BROADBENT D.E., 1957.
Effects of noises of high and low frequency on behaviour. Ergonomics, 1, 21-29.

BROUWER W., WARERINK W.,WOLFFELAAR P., ROTHENGATTER T., 1991.
Divided attention in experienced young and older drivers : lane tracking and visual analysis in a dynamic driving simulator. Human factors, 1991, 33(5), 573-582.

BYSTRÖM S., 1994.
Acceptability of intermittent handgrip contractions based on physiological response; Human factors 1994, 36(1), 158-171.

-C-

CAIL F., 1986.
Présentation de l'information sur écran de visualisation (revue bibliographique). ND 1580-123-86, n°123, 193-200.

CAMUS JF., 1996.
La psychologie cognitive de l'attention. Editions Armand Colin, 217p.
CARSWELL C.M., WICKENS C.D., 1987.
Information integration and the object display. Ergonomics, 30, 511-527.

CHVIDCHENKO I., CHEVALIER J., 1994.
Conduite et gestion de projets Principes et pratiques pour petits et grands projets Editions CEPADUES, 525p.

COFFIN F., 1995.
Méthodologie de conception coopérative de produit complexe. Application au développement d'un prototype d'un système intelligent de co-pilotage automobile. Thèse de doctorat, Université de technologie de Compiègne, 1995.

(DE LA) CRUZ M.J., ROCHE P., 1990.
Trains de vie. Aux Editions Matrice, 202p.

-D-

DANIELLOU F., 1987.
Les modalités d'une ergonomie de conception. Introduction dans la conduite de projets industriels. ND 1647-129-87, CND n°129, 517-523.

DANIELLOU F., 1992.
Le statut de la pratique et des connaissances dans l'intervention ergonomique de conception; Document de synthèse présenté en vue d'obtenir l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Toulouse Le MIRAIL, 100p

DECOSTER F., 1982.
Données anthropométriques sur la main. Rapport interne. UTC Sévenans, annexes 2, 53p.

DUBUISSON S., HENNION A., 1996.
Le design : l'objet dans l'usage. La relation objet-usage-usager dans le travail de trois agences.. Les presses de l'école des Mines de Paris, 121p.

DUCHAMP R., 1988.
La conception de produits nouveaux. Editions Hermès, Paris, 60p.

DURAND D., 1979.
La Systémique, aux éditions PUF, 126p.

-E-

EDWORTHY J., LOXLEY S., DENNIS I., 1991.
Improving auditory warning design : Relationship between warning sound parameters and perceived urgency. Human factors, 33(2), 205-231

EDWORTHY J., 1994.
The design and implementation of non-verbal auditory warnings. Applied ergonomics, 25(4), 202-210.

-F-

FADIER E., 1990.
Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes. Sous la direction de J. LEPLAT, G DE TERSSAC. Chap 2 : Fiabilité humaine : méthodes d'analyse et domaines d'application. Editions Octarès, Marseille. 47-80.

FADIER E., LEFEBVRE M., CANTIN R., 1991.
L'apport des méthodes d'analyse de sûreté à l'étude du système homme-tâche. Application dans le domaine de la métallurgie. Facteurs humains de la fiabilité et de la sécurité des systèmes complexes. Actes du colloque tenu à Vandoeuvre les 17 et 18 avril 1991. INRS Nancy lorraine. Service ergonomie et psychologie industriel, 61-65

FALZON P., TEIGER C., 1995.
Construire l'activité. Performances humaines et techniques, Septembre, n° hors série. 34-40.

FAVERGE J.M., 1969.
L'expérimentation en situation industrielle. Bulletin de psychologie, 276, 22, 9-13, 770-774.

FIDELL S., 1978.
Effectivness of audible warning signals for emergency vehicles. Human factors, 20(1), 19-26

FILIPPI G., HARADJI Y., VILLAME T., 1995.
Analyse de l'activité et coopération des acteurs de la conception. Relations industrielles, vol. 50, N°4, 789-809**.**

FORET J., 1987.
Conditions de travail des conducteurs de train : revue des études physiologiques et psychophysiologiques Le travail humain, tome 50, n° 1, 17-33.

FRIEDBERG E., 1994.
Assemblée pleinière. Dans Impact et conséquences de la technologie sur l'homme et l'entreprise. Actes du colloque de Grenoble 14 Octobre 1994. Aux éditions de L'IRCO, 37-45.

FROMKIN H., STREUFERT S., 1976.
Laboratory experimentation. In Handbook of industrial and organnizational Psychology. DUNETTE MD Eds, chap 10., 415-466.

-G-

GAILLARD I., LEROUX M., 1996.

Nouvelles technologies et conception d'aides à la prise de décision pour les contrôleurs du trafic aérien. L'ergonomie face aux changements technologiques et organisationnels du travail humain. Sous la direction de JC Spérandio. Aux éditions Octarès, 243-255.

GALINIER V., 1996.
Apports de l'ergonomie à la conception d'instruments : concevoir autour des schèmes d'utilisation. Un exemple dans le domaine du transport routier. Thèse de doctorat, université de Grenoble, 315p.

GAMST F., 1975.
Human factors analysis of the diesel-electric locomotive cab. Human factors, 17(2), 149-156.

GARCIA F., 1991.
Prise en compte des facteurs humains dans la conception des postes de travail. Expérience en milieu industriel à Thomson - CSF/SDC Génie logiciel et systèmes experts, n°24, septembre, 50-56.

GARRIGOU A., 1995.
La compréhension de l'activité des concepteurs : un enjeu essentiel pour les ergonomes. Performances humaines et techniques n°74, 12-21.

GAVOILLE E., SAGOT J.C., BOLLON T., BENCHEKROUN M., 1992.
Conception ergonomique du poste de conduite du TGV Nouvelle Génération. Troisième phase d'étude : Analyse statistique de dix trajets TGV. Rapport intermédiaire, contrat PERSEE-GEC ALSTHOM, 35p.

GAVOILLE E., BENCHEKROUN M., SAGOT J.C., 1993.
Conception ergonomique du poste de conduite du TGV Nouvelle Génération. Cinquième phase d'étude : Conception de la future interface homme-machine. Rapport intermédiaire Janvier 93, contrat PERSEE-GEC ALSTHOM, 159p.

GODTHELP H., 1986.
Vehicle control during curve driving. Human Factors. 28(2), 211-221

GODTHELP H., 1988.
The limits of path error-neglecting in straight lane driving.Ergonomics. Vol 31, N°4, 609-619.

GODTHELP H., KÄPLER W., 1988.
Effect of vehicle handling characteristics on driving strategy. Human Factors, 30(2), 219-229.

GOMES S., SAGOT J.C., 1996.
Intervention ergonomique dans la conception d'un poste de conduite automobile. XXXI ème Congrès de la SELF, Bruxelles (Belgique), 11, 12, 13 septembre, 149-155.

GOMES S., BENCHEKROUN M., SAGOT J.C., 1996.
Conception des pupitres futurs, conduite grandes lignes : Définition et modélisation CAO de l'architecture pupitre et de l'interface siège/pupitre. Rapport intermédiaire, contrat PERSEE-GEC ALSTHOM, 80p.

GOMES S., 1998.
Thèse

GRANDJEAN E., 1983.
Précis d'ergonomie. Aux éditions d'organisation, 476p

GUERIN F., LAVILLE A., DANIELLOU F., DURAFFOURG J., KERGUELEN A., 1994.
Comprendre le travail pour le transformer: la pratique de l'ergonomie. Aux éditions de l'ANACT, 233p.

GUIDAT C., 1997.
Sciences de l'innovation, positionnement de la discipline, Orientation de développement. Document interne ENSGSI - INPL NANCY, Janvier 1997.

GUYONNET J.F., DIB A., 1992.
Sécurité technique et humaine du TGV, Rapport d'étude, Août 1992.

-H-

HAGA S., 1984.
An experimental study of signal vigilance errors in train driving. Ergonomics, vol 37, n°7, 755-765.

HAKKINEN M.T., WILLIGES B.H., 1984.
Synthesized warning messages : effects of an alerting cue in single-and multiple-function voice synthesis systems. Human factors, 26(2), 185-195

HAAS E., CASALI J., 1995.
Perceived urgency of and response time to multi-tone and frequency-modulated warning signals in broadband noise. Ergonomic, 38 (11), 2313-2326.

HEDBERG G., 1987.
Evaluation of the driver's cab in the RC5 engine Applied ergonomics, 18.1, 35-42.

HELLIER E.J., HEDWORTHY J., DENNIS I., 1993.
Improving auditory warning design : quantifying and predicting the effects of different warning parameters on perceived urgency. Human factors, 35(4), 693-706

HOC J.M., 1996.
Supervision et contrôle de processus. La cognition en situation dynamique. Presses universitaires de Grenoble, 207p.

HUGUES P., COLE B., 1986.
What attracts attention when driving ? Ergonomics, vol39, n°3, 377-391.

-I-

IMBEAU D., WIERWILLE W., WOLF L., CHUN G., 1989.

Effects of instrument panel luminance and chromaticity on reading performance and preference in simulated driving. Human factors, 31(2), 147-160.

(D') IRIBARNE A., 1994.
Assemblée pleinière. Dans Impact et conséquences de la technologie sur l'homme et l'entreprise. Actes du colloque de Grenoble 14 Octobre 1994. Aux éditions de L'IRCO, 29-36.
ITOH Y., HAYASHI Y., 1990.
The ergonomic evaluation of eye movement and mental workload in aircraft pilots Ergonomics, 1990, vol 33, N°6, 719-733.

-J-

JEFFROY F., 1992.
Les recommandations en ergonomie du logiciel. Génie logiciel et systèmes experts, décembre, n°29, 40-46.

JOURDAN M., BELLIES L., 1996.
De l'analyse du travail à l'intervention ergonomique : l'expérience d'une collaboration à la conception d'un système automatisé de production. L'ergonomie face aux changements technologiques et organisationnels du travail humain. Sous la direction de JC Spérandio. Aux éditions Octarès, 159-173.

JURAIN T., 1991.
De l'écrit à l'écran. Etude et classification des aides logicielles au développement d'interfaces graphiques. Génie logiciel et systèmes experts, septembre, n°24, 28-42.

-K-

KARSENTY S., 1991.
La construction d'interfaces utilisateurs. Génie logiciel et systèmes experts, 1991, septembre, n°24, 18-27.

(DE) KEYSER V., VAN DAELE A., 1988.
L'ergonomie de conception. Editions De Boeck, Bruxelles.

KEYSON D.K., PARSONS K.C., 1990.
Designing the user interface using rapid prototyping Applied ergonomics, 21.3, 207-211

KOELEGA H., BRINKMAN J.A., 1986.
Noise and vigilance : an evaluation review Human factors, 28(4), 465-481.

KOLSKI C., 1997.
Interfaces Homme-Machine : application aux systèmes industriels complexes. 2ème édition. Editions Hermès, collection informatique, 477p.

-L-

LABIALE G., 1991.

Performance de détection visuelle des informations d'alerte dans le véhicule. In Le maintien de la vigilance dans les transports, journées d'étude de l'INRETS. Collection transport et communication, 159-170.

LAMONDE F., 1994.
La détermination progressive de l'activité des conducteurs de train : contribution à l'analyse de la fiabilité d'un système ferroviaire. Résumé de thèse dans Le travail humain, Tome 57, n°2, 195-200.

(MC) LANE R., WIERWILLE W., 1975.
The influence of motion and audio cues on driver performance in an automobile simulator. Human factors, 17(5), 488-501.

LAUTIER F., TESSIER D., 1994.
Du schéma à l'espace, concevoir les espaces de travail. XXIV ème congrès de la SELF. Ergonomie et ingénierie, Septembre, vol 2, 45-54.

LAZARUS H., HÖGE H., 1986.
Industrial safety : acoustic signals for danger situations in factories. Applied ergonomics, 17.1,41-46.

LEBAHAR JC., 1997.
La simulation, comme instrument de représentation et de régulation dans la conception de produits. in La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir. Octarès Editions, 77-96.

LEMOIGNE J.L., 1996.
Conception des systèmes complexes :Le projet des nouvelles sciences de l'ingénieur., dans Penser le futur Editions Psa Peugeot Citroën., 155-177.

LENCLUD T., 1993.
Contribution à la conception d'un système intégré de simulation des systèmes de production. Thèse de Doctorat, université de Valenciennes, 112p.

LEPLAT J., 1978.
L'equivalence des situations de laboratoire et de terrain. Le travail humain, 41, 2, 307-318.

LEPLAT J., 1985.
Erreur humaine, fiabilité humaine dans le travail. Aux éditions Armand Colin Paris, 197p.

LIEURY, CHOUKROUN, 1985.
Rôle du mode de présentation (visuel, auditif, audio-visuel) dans la mémorisation d'instructions. Année psychologique, 85, 503-516.

LINDSAY P.H, NORMAN D.A., 1980.
Traitement de l'information et comportement humain, une introduction à la psychologie. Editions Etudes Vivantes, Montréal-Paris.

LING S., 1991.
Assessing driving capability : A method for individual testing Applied ergonomics, 1991, 22.2, 75-84

LINTERN G., 1989.
Simulator design and instructional features for air-to-ground attack : a transfer study. Human factors, 31(1), 87-99

-M-

MALATERRE G., SAAD F., 1986.
Les aides à la conduite : définitions et évaluation. Exemple du radar anti-collision. Le travail humain, tome 49, n°4, 333-346.

MALATERRE G., HARY A., QUERE F., 1991.
Analyse spectrale des mouvements de volant par temps de brouillard sur simulateur de conduite. Recherche Transport Sécurité N°30, Juin 1991, p52-56.

MALINE J., 1994.
Simuler le travail, une aide à la conduite de projet. Editions de l'ANACT, Montrouge, 156p.
MAZEAU M., CHRISTHOL J., 1995.
De l'analyse de l'activité à l'élaboration des solutions. Performances humaines et techniques,. N° hors série Septembre, 52-62.

MESTRE D., 1987.
Représentation de la dynamique du véhicule lors du contrôle visuel du déplacement. Le travail humain, tome 50, n°1, 47-61.

MEISTER D., 1995.
CHAP8 :Simulation and modelling. In Evaluation of human work. A practical ergonomics methodology. Edited by J.R. Wilson and E.N. Corlett. Taylor et Françis.203-228.

MILLOT P., 1988.
Supervision des procédés automatisés et ergonomie. Aux éditions HERMES, 237p.

MOMTAHAN K., HETU R., TANSLEY B., 1993.
Audibility and identification of auditory alarms in operating rooms and an intensive care unit. Ergonomics, 1993, 36(10), 1159-1176.

(DE) MONTMOLLIN M., 1994.
L'ergonomie. Editions de la découverte, Paris.

(DE) MONTMOLLIN M., 1995.
Modèle, in M. De Montmollin (ED), Vocabulaire de l'ergonomie, Octarès (Toulouse).

MOREAU J.C., 1994.
Le progrès technologique est-il compatible avec le progrès de l'homme ? Dans Impact et conséquences de la technologie sur l'homme et l'entreprise. Actes du colloque de Grenoble 14 Octobre 1994. Aux éditions de L'IRCO, 83-94.
MORRISON R., SWOPE G., HALCOMB C., 1986.
Movement time and brake pedal placement. Human factors, 28(2), 241-246.

MÜLLER J., SCHNIEDER E., 1994.

Nouvelle interface homme ordinateur pour le contrôle de circulation de train maglev à grande vitesse. IHM 94, Lille les 8 et 9 décembre, 61-67.

-N-

NEBOIT M., 1974.
Perception, anticipation et conduite automobile. Le travail humain, tome 37, n°1, p53-72.

NEBOIT M., GUILLERMAIN H., FADIER E., 1990.
Chap 10 : De l'analyse du système à l'analyse de l'interaction opérateur-tâche : proposition méthodologique. Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes. Sous la direction de J. Leplat, G de Terssac. Editions Octarès, Marseille, 242-265.

NEMIRE K., 1994.
Simulation fidelity of a virtual environnment display. Human factors, 36(2), 79-93

NF X35-105, 1995.
Commandes, organes de service (éléments de choix, caractéristiques, dimensions, emplacements, efforts). Recueil de normes françaises, AFNOR, p92-106.

NICOLET J.L., CARNINO A., WANNER J.C., 1989.
Catastrophes ? Non merci ! La prévention des risques technologiques et humains Aux éditions Masson Paris, le nouvel ordre économique, 250p.

NILSSON L., ALM H., 1991.
Effects of mobile telephone use on elderly drivers' behaviour - including comparisons to young drivers' behaviour. Reprinted from Drive Project V1017 (Bertie), 31p.

NILSSON L., 1995.
Chapter 36. Contributions and limitations of simulator studies to driver behaviour research. In Evaluation of human work. A practical methodology. Edited by J.R. Wilson and N. Corlett. Taylor et Françis, 401-407.

-O-

O'HARA J.M., 1990.
The retention of skills acquired through simulator-based training. Ergonomics, Vol 33, N°9, 1143-1153.

OMBREDANE A., FAVERGE J.M., 1955.
L'analyse du travail , Paris PUF.

-P-

PACHIAUDI G., MORGILLO F., DELEURENCE P., GUILHON V., 1996.

Utilisation du téléphone mains-libres : impact de la communication sur la conduite automobile. Approche expérimentales sur simulateur de conduite et en conditions réelles de circulation.. Rapport INRETS n°212, 106p.

PARK K., 1992.
A computer-aided aptitude test for predicting flight performance of trainees Human factors, 1992, 34(2), 189-204

PARIS C.R., GILSON R.D., THOMAS M.H., SILVER N.C., 1995.
Effect of synthetic voice intelligibility on speech comprehension. Human factors, 37(2), 335-340

PARSONS K.C., 1995.
Ergonomics of the physical environment : International ergonomics standards concerning speech communication, danger signal, lighting, vibration and surface temperatures. Applied ergonomics, 26.4,281-292.

PATTERSON R.D., 1983.
Guidelines for auditory warning systems on civil aircraft. Civil Aviation Authority. Paper 82017, 64p.

PATTERSON R.D., 1990.
Auditory warning sounds in the work environment. Phil. Trans. R. Soc. Lond., B327, 485-492

PERUCH P., MESTRE D., GIRAUDO M.D., 1988.
Quelques aspects fondamentaux de l'introduction de nouvelles technologies dans le domaine des transports. Le travail humain, tome 51, n°3, 243-254.

PINSKI L., THEUREAU J., 1987.
L'étude du cours d'action : analyse du travail et conception ergonomique. (rapport n°88), Paris : Laboratoire de Physiologie du Travail et d'Ergonomie, CNAM.

PLECZON P., 1992.
Eléments de méthodologie et outils pour l'assistance à l'opérateur : Application à la conduite automobile. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure de l'aéronautique et de l'espace, 230p.

POTTIER A., BERTHELON C., MESTRE D., PONS R., 1995.
Dépendance / indépendance à l'égard du champ et anticipation visuelle d'une collision.Actes du XXXème Congrès de la SELF, Biarritz, 27,28 et 29 Septembre, 178-185.

POMIAN , 1997

PORTNOFF A.Y., 1994.
Mourir compétitif ou choisir d'innover. Dans Impact et conséquences de la technologie sur l'homme et l'entreprise. Actes du colloque de Grenoble 14 Octobre 1994. Aux éditions de L'IRCO, 83-94.

-Q-

QUARANTE D., 1994.
Eléments de Design industriel. Aux éditions Polytechnica, 2ème édition, 645p.

-R-

RABARDEL P., 1995.
Les hommes et les technologies : Approche cognitive des instruments contemporains; Editions Armand Colin; Paris, 239p.

RAMACIOTTI D., 1995.
De la position d'observateur dans l'analyse du travail à celle d'acteur dans le processus de conception. Performances humaines et techniques, n° hors série Septembre, 47-51.

RAUCENT B., JOHNSON D.A., 1997.
Linking design and simulation : a student project. In the Journal of engineering Design, Vol 8,19-30.

REASON J., 1993.
L'erreur humaine, PUF, collection le travail humain, 366p.

RIERA B., 1993.
Méthodologie d'évaluation des interfaces homme/véhicule automobile. Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 255p.

ROBERTY M.L., BENCHEKROUN M., VEYRAC H., SAGOT J.C., 1994.
Conception ergonomique du poste de conduite du TGV Nouvelle Génération. Cinquième phase d'étude : Conception de la future interface homme-machine. Rapport intermédiaire Juillet 93, contrat PERSEE-GEC ALSTHOM, 229p.

ROBINSON C., EBERTS R., 1987.
Comparison of speech and pictorial displays in a cockpit environment Human factors, 29(1), 31-44.

ROGERS S., WIERWILLE W., 1988.
The occurrence of accelerator and brake pedal actuation errors during simulated driving. Human factors,30(1), 71-81.

(DE) ROSNAY J., 1975.
Le Macroscope, Editions du seuil, 346p.

ROTAB KHAN MD.R., NAQVI S.A., 1995.
Simulation study of reaction times at varying visual angles. Computer ind engng, vol 28, n°3, 467-472.

ROUSSEL B., LE COQ M., DUCHAMP R., 1994.

Vers une ergonomie des recommandations en conception de produits. Colloque CONFERE, Tours 7-8 Juillet, 277-286.

ROUSSELLE M.P., 1997
Cahier des charges du logiciel SIRFLEX (Simulateur d'imprimeuse flexographique). Rapport de DEA, ENSAM Paris, 60 p.

-S-

SAGOT J.C., MAZET C., 1991.
Conception ergonomique du poste de conduite du TGV Nouvelle Génération
Anthropométrie et volume cabine du TGV Nouvelle Génération : approche théorique. Rapport de fin d'étude contrat PERSEE-GEC ALSTHOM, 257 p.

SAGOT J.C., NEUBERT M., BENCHEKROUN M., 1992.
Conception ergonomique du poste de conduite du TGV Nouvelle Génération. Deuxième phase d'étude : Etude des facteurs de charge. Rapport intermédiaire, contrat PERSEE-GEC ALSTHOM, 103p.

SAGOT J.C., GOMES S., BENCHEKROUN M., NEUBERT M., 1993.
Conception ergonomique du poste de conduite du TGV Nouvelle Génération. Deuxième phase d'étude : Etude des facteurs de charge. Rapport final, contrat PERSEE-GEC ALSTHOM, 103p.

SAGOT JC., ROBERTY ML., BENCHEKROUN M., GARRET D., CHAPPET P., RAIMOND C., 1994.
Intervention ergonomique dans la conception du poste de conduite du TGV nouvelle génération. XXIXe congrès de la SELF, Paris, eds Eyrolles, Tome 2, 12-20.

SAGOT J.C., 1996.
Pour améliorer simultanément moyens de production et conditions de travail : L'ERGONOMIE. La technique moderne n°6-7, 7-12.

SAGOT J.C., ZWOLINSKI P., 1996.
Reconception ergonomique d'un atelier de décompte. XXXIème Congrès de la SELF (Société d'Ergonomie et de Langue Française), Bruxelles (Belgique), 11,12 et 13 Septembre, Ed. SELF, Vol 1, 238-246.

SAGOT J.C., GOUIN V., LORINQUER J.P., CHAPPET P., 1997.
The high speed train : an ergonomic approach for the driving cab design. WCRR'97 Congress (World Congress on Railway Research), 16-19 Novembre1997, Florence(Italie), vol.A, 843-851.

SANDERS M., MC CORMICK, 1993.
Human factors in engeenering and design. McGRAW-HILL international editions, seventh edition, 789p**.**

SANDERSON P.M., FLACH J.M., BUTTIGIEG M.A., CASEY E.J, 1989.

Object displays do not always support better integrated task performance. Human factors, 31, 183-198.

SEBILLOTTE S., 1991.
Décrire des tâches selon les objectifs des opérateurs. De l'interview à la formalisation. Le travail humain, tome 54, n°3, 193-223.

SEIDLER K.S., WICKENS C.D.S., 1992.
Distance and organization in multifonction displays Human factors, 34(5), 555-569.

SENACH B., 1993
L'évaluation ergonomique des interfaces homme-machine : une revue de la littérature. L'ergonomie dans la conception des projets informatiques. Sous la direction de JC Spérandio. Aux éditions Octarès, 69-122.

SIEBERT S., SICARD Y, THEBAULT M.-H., 1998.
Comparaison d'interfaces de conduitye. Essais incidentels sur pupitre imageries graphiques. Le travail Humain, 51 (1), 81-95.

SIMPSON C.A., WILLIAMS D.H., 1980.
Response time effects of alerting tone and semantic context for synthesised voice cockpit warnings. Human factors, 22(3), 319-330.

SKIPPER J., WIERWILLE W., 1986.
Drowsy driver detection using discriminant analysis. Le travail humain, 1986, 28(5), 527-540.

SORKIN R., KANTOWITZ B.H., KANTOWITZ S.C., 1988.
Likelihood alarm displays. Human factors, 30(4), 445-459.

SPERANDIO J.C., 1977.
La régulation des modes opératoires en fonction de la charge de travail de travail chez le contrôleurs de trafic aérien, Le Travail Humain, 40, n°2.

SPERANDIO J.C., 1988.
L'ergonomie du travail mental. Editions Masson, Paris, 140p.

SPERANDIO J.C., DESSAIGNE M.F., 1988.
Une comparaison expérimentale entre modes de présentation visuels ou auditifs de messages d'information routières à des conducteurs automobiles. Le travail humain, 51/3, 257-268.

-T-

TAINSH M.A., 1985.
Job process charts and man computer interaction within naval command systems. Ergonomics, vol 28, n°3, 555-565

(DE) TERSSAC G., DUBOIS P., 1992.
Les nouvelles rationnalisations de la production, aux éditions Cépaduès, avec le concours du PIRTTEM - CNRS, 290p.

THEUREAU J., PINSKY L., 1984.
Paradoxe de l'ergonomie de conception et logiciel informatique. Revue des conditions de travail n°9.

TULLIS T.S., 1981.
An evaluation of alphanumeric, graphic, and color information displays. Human factors, 23, 541-550.

-U-

UMBERS I.G., 1987.
Coding techniques for process plant VDU format. Applied ergonomics 21.3, 187-198.

-V-

VALOT C., AMALBERTI R., 1989.
Les redondances dans le traitement des données Le travail humain, tome 52, n° 2, 155-174.

VAN COTT H.P., KINKADE R.G., 1972.
Human engineering guide to equipment design. Sponsored by joint Army-Navy-Air Foce Steering Committee. (Revised edition), washington DC, 750p.

VAN DAELE A., 1988.
L'écran de visualisation ou la communication verbale ? Analyse comparative de leur utilisation par des opérateurs de salle de contrôle en sidérurgie. Le travail humain, 51.1, 65-79.

VENDA V., STISHKOVSKAYA N., DROMEY I., 1994.
Experimental studies of control problem-solving processes using a graphic mnemonic display; Ergonomics, vol 37, N°10, 1709-1727.

VERNET M., BLANCHET V., SERVIGNAT C., ENVIRONNETECH, 1995.
Informations routières dans le véhicule : ergonomie des aides de proximité (MRPI). Rapport LESCO n°9516, Décembre. Editions INRETS.

VIDAL F., 1995.
La créativité totale : les nouvelles stratégies du Japon. InterEditions, 163p.
VILLEMEUR A., 1988.
Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité - Facteurs humains - Informatisation. Paris , Eyrolles. Collection de la Direction des Etudes et recherches d'Electricité De France.

-W-

WADE ALLEN R., ROSENTHAL T., 1994.
Meeting important cuing requirements with modest, real time, interactive driving simulations. SAE Technical paper, n°940228, 133-144.

WIERWILLE W., FUNG P., 1975.
Comparison of computer-generated and simulated motion picture displays in a driving simulation. Human factors, 17(6), 577-590.

WIERWILLE W., GUTMANN J., 1978.
Comparison of primary and seconddary task measures as a function of simulated vehicle dynamics and driving conditions. Le travail humain, 20(2), 233-244.

WIERWILLE W., 1983.
Driver steering reaction time to abrupt-onset crosswinds, as measured in a moving-base simulator. Le travail humain, 25(1), 103-116

WIERWILLE W., CONNOR S., 1983.
Evaluation of 20 workload measures using a psychomotor task in a moving-base aircraft simulator. Le travail humain, 25(1), 1-16.

WIERWILLE W., RAHIMI M., 1985
Evaluation of 16 measures of mental workload using a simulated flight task emphasing mediational activity. Le travail humain, 27(5), 489-502.

WISNER A., 1975.
L'analyse de la situation de travail, méthodes et techniques, cours B3, Laboratoire d'Ergonomie, Paris : CNAM.

WISNER A., 1995.
Ergonomie et analyse ergonomique du travail : un champ de l'art de l'ingénieur et une méthodologie générale des sciences humaines. Performances humaines et techniques n° hors série Septembre, 74-78.

WOGALTER M.S., YOUNG S.L., 1991.
Behavioural compliance to voice and print warnings. Ergonomics, 34, 79-89.

WOODSON L.H., 1954.
Human engineering guide for equipment designers. University of California Press.

WOODSON W. E., CONOVER D.W., 1978.
Guide d'ergonomie, Adaptation de la machine à l'homme; Les éditions d'organisation, Paris.

-Z-

ZWOLINSKI P., 1995.
Reconception ergonomique de postes de travail. Rapport de DEA, 56p.

ZWOLINSKI P., SAGOT J.C., 1996.

Evaluation et conception des informations sonores : projet TGV NG. Rapport final, contrat PERSEE-SNCF, 160p

ZWOLINSKI P., SAGOT J.C., GOUIN V., 1998.
La simulation de l'activité comme outil d'aide à la conception et à l'innovation. Application à la conception de la commande de régulation de vitesse des TGV futurs. Actes des 2èmes Journées Recherche et Ergonomie, organisées par la SELF, Toulouse 9, 10, 11 Février, Edit. SELF, p 71-75.

ZWOLINSKI P., SAGOT J.C., 1998.
A simulation approach to the design and evaluation of auditory interfaces in a high speed train driving cab. The fifth International Conference on Auditory Display (ICAD 98), University of Glasgow, November 1-4, 10 p.

10. TABLE DES MATIERES

1. PROBLÉMATIQUE ---------- 11

1.1 Apports et limites des méthodes de conception de produits. ---------- 16
1.1.1 Repères concernant la conception de produits ---------- 16
1.1.2 Limites d'une conception technocentrée dans la conception des systèmes complexes ---------- 21
1.2 Apports et limites de l'ergonomie en conception de produits. ---------- 23
1.2.1 Repères concernant l'ergonomie ---------- 23
1.2.2 Limites liées à l'intégration des recommandations ergonomiques dans la conception de produits 25
1.3 Les outils communs pour la prise en compte du facteur humain et des facteurs techniques ---------- 28
1.4 Simuler le travail : une aide à la conduite de projet (MALINE, 1994) ---------- 29
1.5 Les applications actuelles de la simulation de certaines conditions d'exercice de l'activité de conduite ---------- 35
1.6 La démarche de simulation de l'activité dans le processus de conception de la cabine de conduite des TGV futurs ---------- 37

2. LE PROJET DE CONCEPTION DE LA CABINE DE CONDUITE DES TGV FUTURS ---------- 41

2.1 Historique du projet de conception de la cabine de conduite des TGV futurs ---------- 43
2.2 Mise en place du projet de conception de la cabine de conduite des TGV futurs ---------- 44
2.2.1 Constitution du groupe de travail ---------- 44
2.2.2 Déroulement prévisionnel des recherches poste de conduite ---------- 46
2.2.3 Etude ergonomique menée lors des phases d'analyses ---------- 47
2.3 Analyse du travail et étude du comportement de conduite du mécanicien : ---------- 51
2.3.1 L'analyse de la tâche et de l'activité ---------- 52
2.3.2 Outils et méthodes utilisés lors de l'analyse du travail des conducteurs de train ---------- 53
2.3.3 Le travail du conducteur de TGV ---------- 56
2.3.4 La régulation de la vitesse ---------- 59
2.3.5 Descriptif des éléments en cabine directement liés à l'activité de régulation de la vitesse ---------- 62
2.3.6 Principaux éléments issus de l'analyse tâche/activité des conducteurs TGV. ---------- 67
2.4 Spécification des besoins liés à la conduite future ---------- 70
2.4.1 Définition du «champ des activités futures souhaitables» ---------- 71
2.4.2 Le cahier des charges fonctionnel des dispositifs ---------- 79
2.5 Bilan de la phase d'étude de faisabilité ---------- 82

3. LA DEMARCHE DE SIMULATION DE L'ACTIVITÉ EN PHASE DE DÉFINITION ET D'ÉVALUATION DES PRÉCONCEPTS ---------- 83

3.1 Objectifs ---------- 85
3.2 Méthode générale concernant la démarche de simulation en phase de définition des préconcepts ---------- 86
3.3 Le manipulateur de conduite ---------- 91
3.3.1 Hiérarchisation des besoins et définition d'un principe de solution ---------- 91
3.3.2 Les scénarios ---------- 92
3.3.3 Réalisation de la maquette ---------- 95
3.3.4 Mise en place des expérimentations ---------- 97
3.4 Le dispositif de vitesse butée ---------- 104
3.4.1 Hiérarchisation des besoins et définition d'un principe de solution ---------- 104
3.4.2 Le scénario ---------- 105
3.4.3 Réalisation de la maquette ---------- 106
3.5 Les interfaces visuelles liées à la régulation de la vitesse ---------- 107

3.5.1 Hiérarchisation des besoins et définition d'un principe de solution ---- 108
3.5.2 Les scénarios ---- 109
3.5.3 Réalisation de la maquette ---- 114
3.5.4 Mise en place des expérimentations ---- 119
3.6 L'implantation des dispositifs ---- 126
3.6.1 Hiérarchisation des besoins et définition d'un principe de solution ---- 126
3.6.2 Les scénarios ---- 127
3.6.3 Réalisation de la maquette ---- 130
3.6.4 Mise en place des expérimentations ---- 131
3.7 Les informations sonores en cabine ---- 133
3.7.1 Hiérarchisation des besoins et définition d'un principe de solution ---- 133
3.7.2 Les scénarios ---- 134
3.7.3 Réalisation de préconcepts ---- 136
3.7.4 Mise en place des expérimentations ---- 137
3.8 Discussion générale sur l'utilisation de la simulation en phase de définition et d'évaluation des préconcepts ---- 142

4. MISE EN PLACE DES EXPÉRIMENTATIONS SUR SIMULATEUR D'ÉTUDE ET DE CONCEPTION ---- 148
4.1 Le simulateur d'étude et de conception pour la conduite ferroviaire ---- 151
4.1.1 Présentation générale du simulateur ---- 151
4.1.2 Description du simulateur d'étude et de conception ---- 152
4.2 Mise en place des expérimentations ---- 160
4.2.1 Echantillon de conducteurs retenus ---- 160
4.2.2 Protocole général des expérimentations sur simulateur ---- 162

5. PREMIÈRE SÉRIE EXPÉRIMENTALE : ÉVALUATION INTRINSÈQUE DU CONCEPT LIÉ À LA RÉGULATION DE LA VITESSE EN SITUATION DE CONDUITE SIMULÉE ---- 166
5.1 Utilisation du manipulateur de conduite ---- 170
5.1.1 Objectifs ---- 170
5.1.2 Méthodes ---- 170
5.1.3 Résultats concernant l'utilisation du manipulateur de conduite ---- 178
5.1.4 Discussion concernant l'utilisation du manipulateur de conduite ---- 192
5.2 Détection d'informations visuelles ---- 197
5.2.1 Objectifs ---- 197
5.2.2 Méthodes ---- 197
5.2.3 Résultats liés aux interfaces graphiques ---- 199
5.2.4 Discussion concernant la détection des informations visuelles ---- 200
5.3 Interprétation des alarmes sonores ---- 203
5.3.1 Objectifs ---- 203
5.3.2 Méthodes ---- 203
5.3.3 Résultats liés aux interfaces sonores ---- 206
5.3.4 Discussion concernant l'interprétation des alarmes sonores ---- 209
5.4 Conclusion sur cette étape d'évaluation intrinsèque du concept lié à la régulation de la vitesse en situation de conduite simulée ---- 212

6. DEUXIÈME SÉRIE EXPÉRIMENTALE : ÉVALUATION GLOBALE DU CONCEPT LIÉ À LA RÉGULATION DE LA VITESSE EN SITUATION DE CONDUITE SIMULÉE ---- 215
6.1 Objectifs ---- 217
6.2 Méthodes ---- 219
6.3 Résultats ---- 222
6.3.1 Résultats liés à l'étude des phases d'arrêts en gare ---- 222
6.3.2 Résultats liés à l'étude des stratégies visuelles ---- 229

6.4 Discussion sur les résultats de la phase d'évaluation globale du concept lié à la régulation de la vitesse---------- 238

7. DISCUSSION GÉNÉRALE SUR LA DÉMARCHE DE SIMULATION DE L'ACTIVITÉ PROPOSÉE ---------- 241

7.1 La démarche de simulation de l'activité---------- 244
7.1.1 Définition du champ des activités futures souhaitables, en phase d'études préliminaires ------- 244
7.1.2 Evaluations fonctionnelles et opérationnelles des dispositifs en phase de définition des préconcepts. ---------- 246
7.1.3 Optimisation des dispositifs et évaluation de la performance du système Homme-Machine lors de la phase d'études détaillées.---------- 247
7.1.4 Intérêts d'une telle démarche---------- 248
7.2 Limites de la simulation de l'activité dans les projets de conception.---------- 249
7.3 Intérêt de la simulation pour les utilisateurs ---------- 251
7.4 Intérêt de la simulation pour les concepteurs ---------- 252
7.5 Intérêt de la simulation dans le projet de conception ---------- 253
7.6 Perspectives---------- 254

8. CONCLUSION ---------- 258

9. BIBLIOGRAPHIE ---------- 264

10. TABLE DES MATIÈRES---------- 283

11. TABLE DES FIGURES ---------- 286

12. LISTE DES TABLEAUX ---------- 289

11. TABLE DES FIGURES

Figure 1 : L'approche séquentielle décrite par BOCQUET (1996). ---- 17
Figure 2 : Démarche de conception industrielle (AOUSSAT, 1990). ---- 18
Figure 3 : Comparaison de deux démarches de simulation (MALINE, 1994). ---- 31
Figure 4 : La démarche de simulation de l'activité en ergonomie au cours d'une conduite de projet ---- 33
Figure 1 : Cabine de conduite du TGV A. ---- 44
Figure 2 : Association clients, constructeurs, ergonomes. ---- 45
Figure 3 : Programme prévisionnel du groupe de travail poste de conduite des TGV futurs. ---- 47
Figure 4 : Volume d'atteinte maximal des membres supérieurs du 95e centile masculin français (taille : 1,81 m). ---- 48
Figure 5 : Volume optimal de préhension du 95e centile masculin français et champs visuels central (A) et périphérique (B). ---- 48
Figure 6 : Place et direction des caméras embarquées en cabine. ---- 55
Figure 7 : Image obtenue après compression des images des 4 caméras en cabine. ---- 55
Figure 8 : Exemple de représentation d'un trajet sur ligne classique. ---- 60
Figure 9 : Objectifs prescrits ou contraintes existantes influençant la régulation de la vitesse. ---- 61
Figure 10 : Objectifs effectifs de la régulation de la vitesse. ---- 62
Figure 11 : Schémas du poste de conduite et des différents éléments qui le composent. ---- 63
Figure 12 : Descriptif des éléments du manipulateur de traction freinage électrique. ---- 64
Figure 13 : Schéma de la fonction de régulation de vitesse dans le système actuel. ---- 74
Figure 14 : Schéma de la fonction de régulation de vitesse dans le système futur retenu. ---- 78
Figure 15 : Exemple de diagramme fonctionnel pour une information sonore. ---- 81
Figure 1 : Démarche générale adoptée lors de la définition et de la mise en oeuvre des préconcepts de dispositifs liés à la régulation de la vitesse des TGV futurs. ---- 87
Figure 2:Scénario envisageable lors des phases de ralentissement et d'arrêts en gare. ---- 93
Figure 3 : Repères et positions du manipulateur traction-freinage. ---- 94
Figure 4 : Vue de la maquette prototype du manipulateur de traction freinage. ---- 96
Figure 5: Efforts à fournir pour manipuler la commande de traction freinage de la maquette initiale dans ses différentes positions. ---- 97
Figure 6 : Dispositif mis en place pour l'essai du manipulateur. ---- 98
Figure 7 : Modèle final d'enveloppe retenu pour le futur manipulateur. A gauche le modèle clay pour les tests. A droite le modèle polystyrène pour la modélisation CAO. ---- 102
Figure 8 : Modèle CAO obtenu de la commande retenue. ---- 103
Figure 9 : Prototype fonctionnel du manipulateur de traction freinage. ---- 103
Figure 10: Organigramme lié à l'utilisation du dispositif de vitesse imposée. ---- 105
Figure 11 : Maquette fonctionnelle du boîtier de Vitesse Imposée (VI). ---- 106
Figure 12 : Exemple de scénario mettant en évidence la prise d'information visuelle ---- 110
Figure 13 : Répartition des zones informationnelles, pour les interfaces visuelles. ---- 112
Figure 14 : Exemples de principes pouvant être adoptés pour la présentation des informations visuelles. ---- 113
Figure 15 : VAPS, utilisé depuis la spécification du produit, jusqu'à la réalisation du prototype (JURAIN, 1991). ---- 116
Figure 16 : Préconcept d'interface, avec distance but figurative. ---- 118
Figure 17 : Préconcept d'interface avec barregraphes pour les niveaux de traction et de freinage. ---- 119

Table des figures

Figure 18 : Plate-forme d'évaluation des interfaces graphiques. ---------- 120
Figure 19 : Schéma de l'interface Traction/Freinage. ---------- 123
Figure 20 : Schéma de l'interface vitesse. ---------- 124
Figure 21:Interface vitesse. Poste de conduite des TGV futurs. ---------- 125
Figure 22:Interface de traction freinage. Poste de conduite des TGV futurs. ---------- 125
Figure 23 : Exemple d'une séquence d'actions à réaliser, pour le respect d'une consigne de vitesse restrictive ---------- 128
Figure 24 : Définition d'une implantation possible par un des conducteurs. ---------- 129
Figure 25 : Implantation finale des dispositifs sur le pupitre. ---------- 129
Figure 26 : Section du volume d'atteinte et de confort pour le 5ème centile masculin ---------- 130
Figure 27 : Maquette de validation des dimensions du pupitre et de l'implantation des commandes. ------ 132
Figure 28 : Scénario général lié l'apparition d'une information sonore en cabine de conduite. ---------- 135
Figure 29 : Lois d'évolution des sons qui constituent le bruit de fond simulé au sein de la cabine de conduite des TGV. ---------- 139
Figure 1 : Description des différents éléments du simulateur ---------- 152
Figure 2 : Vue du matériel informatique à l'extérieur du simulateur ---------- 153
Figure 3 : Vue extérieure de la maquette échelle 1, du volume cabine ---------- 154
Figure 4 : Vue de l'intérieur du simulateur d'étude et de conception pour la conduite ferroviaire ---------- 155
Figure 5 : Dispositifs mis en place concernant la reproduction des sons dans la cabine du simulateur ---- 158
Figure 6 : Démarche générale des expérimentations sur simulateur. ---------- 163
Figure 1 : Schéma de l'interface vitesse sur laquelle sont indiquées les consignes à respecter. ---------- 171
Figure 2 : Polygone des vitesses de consigne et mode de freinage approprié définissant le scénario 1 ----- 172
Figure 3:Polygone des vitesses de consigne et modes de freinage appropriés définissant le scénario2 ----- 173
Figure 4 : Image filmée par la caméra placée dans le simulateur lors de la passation des scénarios ------- 175
Figure 5: Courbes de vitesse imposée et de vitesse réalisée par le conducteur 2 - Scénario 1. ---------- 176
Figure 6: Courbes de vitesse imposée et de vitesse réalisée par le conducteur 2 - Scénario 2. ---------- 177
Figure 7: Variables temporelles liées aux courbes de vitesse ---------- 179
Figure 8 : Représentation des paramètres relevés pour l'évaluation de Tadc ---------- 180
Figure 9 :Résultats liés à l'analyse de variance, mettant en évidence l'effet de la variable TRFR sur Tadc, pour l'ensemble des conducteurs lors du scénario 1 (*** : p<0.001). ---------- 181
Figure 10 : Nuage de points donné en abscisse par la valeur de Tadc du modèle et en ordonnée par la valeur de Tadc mesurée (scénario 1, phase de traction). ---------- 184
Figure 11 : Moyenne des temps de réaction en fonctions des plages considérées pour l'ensemble des conducteurs (scénario 1, phase de traction). Analyse de variance (*** : p<0.001). ---------- 185
Figure 12 : Nombre moyen d'actions en fonctions des plages considérée pour l'ensemble des conducteurs (scénario 1, phase de traction).Analyse de variance (*** : p<0.001 ; ** :p<0.01). ---------- 185
Figure 13 : Moyenne des temps de réaction en fonctions des plages considérées pour l'ensemble des conducteurs (scénario 1, phase de freinage). Analyse de variance (** : p<0.01). ---------- 186
Figure 14 : Nuage de points donné en abscisse par la valeur de Tadc du modèle et en ordonnée par la valeur de Tadc mesurée (scénario 2, phase de traction). ---------- 189
Figure 15: Moyenne des temps de réaction en fonctions des plages considérées, pour l'ensemble des conducteurs (scénario 2, phase de traction). Analyse de variance (*** : p<0.001). ---------- 190
Figure 16 : Nombre moyen d'actions en fonctions des plages considérées, pour l'ensemble des conducteurs (scénario 2, phase de traction). Analyse de variance (* : p<0.05). ---------- 190
Figure 17 : Nombre moyen d'actions en fonctions des plages considérées, pour l'ensemble des conducteurs (scénario 2, phase de freinage). Analyse de variance (*** : p<0.001). ---------- 191
Figure 18 :Résultats liés à l'analyse de variance, mettant en évidence l'effet de la variable TRFR sur Naction, pour l'ensemble des conducteurs lors du scénario 1 (*** : p<0.001). ---------- 194

Table des figures

Figure 19 :Résultats liés à l'analyse de variance, mettant en évidence l'effet de la variable TRFR sur Naction, pour l'ensemble des conducteurs lors du scénario 1 (*** : p<0.001). ---------- 194
Figure 20 :Résultats liés à l'analyse de variance, mettant en évidence l'effet de la variable TRFR sur Ecart, pour l'ensemble des conducteurs lors du scénario 1 et du scénario 2 (*** : p<0.001). ---------- 195
Figure 21 : Courbe de vitesse réalisée et apparition des cibles. Conducteur 1- scénario cibles.---------- 199
Figure 22 : Relevés effectués pour le conducteur 2, au cours du scénario son---------- 205
Figure 23 : Temps moyen mis pour réaliser l'action attendue en fonction de la catégorie d'alarme considérée, pour l'ensemble des conducteurs, (scénario « son »).---------- 208
Figure 24 : Temps moyen mis pour consulter l'information visuelle en fonction de la catégorie d'alarme considérée, pour l'ensemble des conducteurs, (scénario « son »). ---------- 208
Figure 25 : Ecart moyen entre le temps mis pour consulter l'information visuelle et le temps mis pour réaliser l'action, en fonction de la catégorie d'alarme considérée, pour l'ensemble des conducteurs, (scénario « son »). Analyse de variance (*** : p<0.001 ; * : p<0.05). ---------- 209
Figure 1 : Courbes de vitesse réelle et de vitesse but instantanée. ---------- 220
Figure 2 : Courbes de vitesse réelle et de vitesse but instantanée ---------- 221
Figure 3 : Répartition du nombre de fois où les conducteurs ont utilisé le freinage électrique, pneumatique, ou la traction pour les 11 conducteurs lors du scénario de conduite libre et pour trois conducteurs lors de la première demi-heure de Paris Nice. ---------- 223
Figure 4 : Représentation du plan factoriel suivant les deux premières composantes de l'AFC concernant les actions sur le manipulateur pour les 11 conducteurs lors du scénario de conduite libre. ---------- 225
Figure 5 : Courbe de décélération et efforts de freinage pour le conducteur 7, lors du deuxième arrêt en gare (scénario de conduite libre). ---------- 226
Figure 6: Courbe de décélération et efforts de freinage pour le conducteur 9, lors du premier arrêt en gare (scénario de conduite libre). ---------- 227
Figure 7 :Courbe de décélération et efforts de freinage pour le conducteur 3, lors du premier arrêt en gare (scénario de conduite libre). ---------- 227
Figure 8 : Répartition des durées de regard pour les 11 conducteurs lors du scénario de conduite libre et pour trois conducteurs lors de la première demi-heure de Paris Nice. ---------- 229
Figure 9 : Répartition des effectifs de regard pour les 11 conducteurs lors du scénario de conduite libre et pour trois conducteurs lors de la première demi-heure de Nice-Paris. ---------- 230
Figure 10 : Représentation du plan factoriel suivant les deux premières composantes de l'AFC concernant les séquences de regard en fonction des 11 conducteurs. ---------- 232
Figure 11 : Séquences des regards identifiées chez trois groupes de conducteurs, lors de la passation du scénario de conduite libre.---------- 233
Figure 12: Séquences des regards chez le groupe de conducteurs du parcours Nice-Paris. ---------- 235
Figure 1 :Mise en évidence du champ des activités futures souhaitables, en phase d'études préliminaires. ---------- 245
Figure 2 : Les évaluations fonctionnelles et opérationnelles en phase de définition des préconcepts. ------ 246
Figure 3 : L'optimisation des dispositifs et l'évaluation de la performance du système Homme-Machine, lors des études détaillées.---------- 248
Figure 4 : Apports de la simulation de l'activité aux concepteurs, aux utilisateurs et au projet de conception. ---------- 249
Figure 5 : Préconcept d'implantation de poste de travail ---------- 257

12. LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Contraintes futures à prendre en compte dans la définition du champ des activités futures souhaitables. ---------- 73
Tableau 2 : Extrait du tableau de synthèse lié au cahier des charges fonctionnel.---------- 80
Tableau 1 : Synthèse de l'évaluation de pré-propositions d'alarmes futures. ---------- 141
Tableau 1: Conducteurs retenus pour la phase d'évaluation du concept lié à la régulation de la vitesse. ---------- 162
Tableau 1: Résultats de l'analyse en régression multiple recherchant l'effet de 5 paramètres sur Tadc pour l'ensemble des conducteurs (scénario 1, phase de traction).---------- 182
Tableau 2: Résultats de l'analyse en régression multiple recherchant l'effet sur Tadc des paramètres significatifs retenus, pour l'ensemble des conducteurs (scénario 1, phase de traction). -------- 182
Tableau 3 : Analyse de variance concernant la validité du modèle lié à la variable Tadc, pour l'ensemble des conducteurs (scénario 1, phase de traction). ---------- 183
Tableau 4 : Résultats de l'analyse en régression multiple, recherchant l'effet sur Tadc des paramètres significatifs retenus, pour l'ensemble des conducteurs (scénario 2, phase de traction).-------- 187
Tableau 5: Analyse de variance concernant la validité du modèle lié à la variable Tadc , pour l'ensemble des conducteur (scénario 2, phase de traction). ---------- 188
Tableau 6 : Résultats obtenus au test de mémorisation des items---------- 200
Tableau 7 : Principes de solutions retenus par les douze ADC, concernant chacun des sons étudiés.------ 206
Tableau 1 : Nombre et répartition des actions liées à la régulation de la vitesse lors du scénario de conduite libre.---------- 224
Tableau 2 : Répartition des séquences de regards types en %---------- 231
Tableau 3 : Répartition des séquences de regards types en % pour les trois conducteurs lors de la première demi-heure du trajet réel Nice - Paris. ---------- 234